

**MODELO DE LÓGICA DIFUSA PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
INCONFINADA DEL GNEIS DE ITUANGO**

JUAN DAVID HERRERA CAICEDO

Trabajo de grado como requisito para optar al título de Maestro en Ingeniería

Asesora: GLORIA ELENA ECHEVERRI RAMÍREZ

MEDELLÍN
UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
2013

CONTENIDO

RESUMEN	5
1 INTRODUCCIÓN	6
1.1 OBJETIVOS	8
1.1.1 Objetivo general.....	8
1.1.2 Objetivos Específicos.....	8
1.2 ALCANCE.....	8
1.3 MARCO TEÓRICO.....	9
2 ANTECEDENTES	12
2.1 CONDICIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS	12
2.2 MÉTODOS PARA CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS.....	13
2.3 PROYECTO HIDRO-ITUANGO.....	16
2.3.1 Geología del proyecto.	16
2.3.2 Geomorfología local.	16
2.3.3 Características estructurales.	17
2.4 ESTADO DEL ARTE	20
3 ESTRUCTURACIÓN Y ELABORACIÓN DEL MODELO	22
3.1 MODELO DE LÓGICA DIFUSA.....	22
3.2 REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	24
3.3 REVISIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO EXISTENTES	25
3.4 PROCESAMIENTO DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE, DESCRIPCIÓN DE PERFORACIONES Y DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	31
4 VERIFICACIÓN DEL MODELO	46
5 CONCLUSIONES	48
6 BIBLIOGRAFÍA	49

FIGURAS

Figura 1 – Disposición general de las obras del proyecto – margen derecha.....	19
Figura 2 – Función de pertenencia típica para las variables de entrada del modelo	24
Figura 3 – Módulo tangente 50% del esfuerzo máximo vs. Compresión inconfiada.....	28
Figura 4 – Módulo relativo vs. Profundidad.....	28
Figura 5 – Compresión inconfiada vs. Profundidad.	29
Figura 6 – Módulo tangente vs. Profundidad.....	29
Figura 7 – Tendencias grupo 1	32
Figura 8 – Tendencias grupo 2	32
Figura 9 – Tendencias grupo 3	33
Figura 10 – Tendencias grupo 4	33
Figura 11 – Tendencias grupo 5	33
Figura 12 – Tendencias grupo 6	33
Figura 13 – Tendencias grupo 7	34
Figura 14 – Tendencias grupo 8	34
Figura 15 – Tendencias grupo 9	34
Figura 16 – Distribución UCS vs. Grado de Meteorización.....	38
Figura 17 – Distribución UCS vs. Grado de Foliación.	38
Figura 18 – Distribución UCS vs. Tamaño de grano.	39
Figura 19 – Estructura general del modelo de lógica difusa para estimar la resistencia a la compresión inconfiada.....	39
Figura 20 – Funciones de pertenencia para el grado de meteorización.....	43
Figura 21 – Funciones de pertenencia para el grado de foliación.	43
Figura 22 – Funciones de pertenencia para tamaño de grano.	44
Figura 23 – Funciones de pertenencia para el bloque de salida – Resistencia a la compresión inconfiada (UCS).....	44
Figura 24 – Superficie de control para la compresión inconfiada en función del grado de foliación y el grado de meteorización.	44
Figura 25 – Superficie de control para la compresión inconfiada en función del tamaño de grano y el grado de meteorización.	45
Figura 26 – Superficie de control para la compresión inconfiada en función del grado de foliación y tamaño de grano.....	45
Figura 27 – Resultados de Compresión Inconfiada a partir del modelo de lógica difusa.....	46

TABLAS

Tabla 1 – Clasificación de macizo rocoso mediante el índice RMR.....	14
Tabla 2 – Clasificación de macizo rocoso mediante el índice Q.....	15
Tabla 3 – Resumen exploración de campo etapa de diseño definitivo – Proyecto Ituango.....	25
Tabla 4 – Distribución de ensayos de compresión simple de acuerdo a las obras del proyecto hidroeléctrico.	26
Tabla 5 - Modulo Relativo (Mr) separado por estribos.....	27
Tabla 6 – Resumen de análisis de tendencias.....	32
Tabla 7 – Subdivisión de las variables del modelo.	36
Tabla 8 – Definición de valores para cada una de las variables del modelo.....	40
Tabla 9 – Posibles combinaciones para las funciones de pertenencia.	41
Tabla 10 – Formulación para cada una de las funciones de membresía.	42
Tabla 11 – Formulación para cada una de las funciones de membresía de los conjuntos de salida.....	42

RESUMEN

La resistencia a la compresión inconfiada de la roca intacta es un parámetro utilizado ampliamente para la aplicación de las diferentes metodologías de diseño y caracterización existentes en la mecánica de rocas. Particularmente, en el caso de las obras subterráneas, este parámetro es utilizado como un insumo indispensable para la clasificación y caracterización del comportamiento del macizo rocoso, tanto mediante métodos empíricos como a través de criterios de falla elaborados para este tipo de materiales.

Durante la ejecución de obras subterráneas, la caracterización continua del macizo rocoso implica la estimación constante de la resistencia inconfiada a partir de métodos indirectos o revisiones bibliográficas, obteniéndose rangos de resistencia amplios asociados a tipos de roca particulares que no necesariamente representan el comportamiento real de la geología intervenida.

Por lo tanto, a partir del uso de una herramienta como la lógica difusa, la cual permite la elaboración de modelos de cálculo para estimar variables a partir de descripciones cualitativas de las condiciones que controlan el fenómeno, se estimó la resistencia de la roca intacta del gneis en el cual se encuentran emplazadas las obras del proyecto Ituango, a partir de un modelo y sus funciones de membresía, considerando información geológica básica y de fácil recopilación en el frente de excavación, obteniendo un grado de aproximación adecuado para la caracterización del comportamiento mecánico del macizo rocoso, suficiente para la práctica profesional.

Palabras claves: Lógica difusa, resistencia a la compresión inconfiada, macizo rocoso, funciones de pertenencia, Índice de Resistencia Geológico.

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto Ituango es en la actualidad la mayor hidroeléctrica en desarrollo del país, con una capacidad de generación instalada de 2400 MW y una producción de energía promedio de 14000 GW/h.

Sus obras se desarrollan sobre el río Cauca, a unos 8 kilómetros aguas abajo del puente de Pescadero, sobre la carretera que conduce al Municipio de Ituango. El cañón del río Cauca divide las cordilleras Central y Occidental de los Andes colombianos, las cuales presentan marcadas diferencias desde el punto de vista de su evolución geológica y estructural. La cordillera Occidental tiene un origen marino, mientras que la cordillera Central presenta una evolución de tipo continental, representando dos diferentes terrenos autóctonos suturados a través del sistema de fallas Cauca – Romeral a finales del periodo Cretáceo (Restrepo y Toussaint, 1989¹⁹). Este hecho permite encontrar una gran variedad de tipos de roca y depósitos no consolidados; sin embargo, las obras principales del proyecto y particularmente, el macizo rocoso de interés para esta investigación, se localizan sobre una litología homogénea correspondiente a gneises esquistosos.

Aunque el embalse del proyecto se extiende desde el sitio de presa localizado inmediatamente aguas arriba de la desembocadura del río Ituango en el río Cauca, hasta inmediaciones de la población de Liborina, las obras de ingeniería se encuentran en un sector del cañón del río Cauca de aproximadamente 1,9 km de longitud, desde los portales de entrada de los túneles de desviación situados a unos 1200 m aguas arriba de la desembocadura del río Ituango, hasta los portales de salida de los túneles de descarga, unos 700 m aguas abajo de la misma desembocadura.

Las obras subterráneas del Proyecto comprenden más de 9 km en túneles (desviación, conducción, descarga y acceso), así como el complejo de cavernas compuesto por la caverna de transformadores (19 m de alto, 16 m de ancho y 200 m de longitud), la caverna principal (49 m de alto, 23 m de ancho y 240 m de longitud) y dos (2) almenaras (una para cada cuatro unidades de generación).

El diseño de excavaciones subterráneas, a pesar de tener como punto de partida el análisis de un completo programa de exploración ejecutado durante las diferentes etapas del Proyecto (más de 3000 m de perforación ejecutados en la etapa de diseño, además de lo desarrollado en las etapas anteriores), es un proceso que debe ser constantemente retroalimentado con la información disponible en cada uno de los avances del frente de excavación. Para esto, el diseñador definió condiciones geomecánicas típicas para cada tipo de terreno que pudiera encontrarse en los diferentes túneles del proyecto, teniendo presente las diferentes secciones de excavación de cada uno. Existen varios métodos disponibles para la clasificación del macizo rocoso en obras subterráneas, entre los cuales los más utilizados es el desarrollado por el Instituto Noruego de Geotecnia (Barton N, Lien R y Lunde J, 1974¹) y el Rock Mass Rating (RMR) desarrollado por Bieniawski (Bieniawski Z.T, 1989⁶). Además de estos métodos, para el análisis del comportamiento geomecánico de macizos rocosos también es de amplio uso la metodología del criterio de falla de Hoek-Brown (Hoek E y Brown E.T, 1980⁹), representado por el Geological Strength Index (GSI) (Hoek E y Brown E.T, 1997¹¹), el cual permite inferir las propiedades del macizo rocoso a partir de las de la roca intacta, introduciendo el grado de libertad al movimiento asociado a la condición de fracturamiento y el estado de las discontinuidades del macizo.

Uno de los parámetros de la roca intacta presente en los métodos anteriormente mencionados es la resistencia a la compresión confinada (UCS por sus siglas en inglés), de la cual para el Proyecto Ituango se tienen más de 70 datos en la etapa de diseño (además de ensayos de carga puntual y triaxiales); sin embargo, para la clasificación de macizo rocoso en el frente, toda esta información es representada a partir de un resultado promedio o de estimaciones indirectas en el sitio.

Es por esto que la investigación presentada en este documento logra, a partir de una descripción cualitativa de las características de la roca intacta similar a la utilizada, la recopilación de información geológica del frente de excavación e inferir la resistencia a la compresión confinada de ésta. Con este fin, se buscó un procedimiento que permitiera convertir las descripciones cualitativas en resultados cuantitativos y se encontró que la herramienta que más facilidades proporcionaba para esta tarea era la lógica difusa (Fuzzy Logic).

Una de las principales características de la lógica difusa es la habilidad de expresar el nivel de ambigüedad presente en la subjetividad y el lenguaje humano (incluyendo el lenguaje natural) en una manera relativamente no distorsionada.

Haciendo uso de los procesos de lógica borrosa y la información suministrada por el Proyecto Ituango, se estructuró la investigación la cual consta de cuatro (4) etapas principales, las cuales se describen a continuación:

- Recopilación de información bibliográfica, la cual consistió en la realización de un barrido general de la literatura ingenieril disponible, libros, publicaciones, artículos, memorias de congresos, entre otros, con el fin de identificar las bases matemáticas, variación de las formulaciones, análisis de las hipótesis y particularidades del método seleccionado para proyectos similares.
- Revisión de la información suministrada por Empresas Públicas de Medellín. Se le realizó la revisión, análisis y selección de la información geológica y geotécnica (ensayos de laboratorio y de campo, geología, etc.). Se analizaron los datos correspondientes a los ensayos de compresión confinada realizados sobre los núcleos de roca obtenidos de las perforaciones ejecutadas durante el programa de exploración llevado a cabo en la etapa de estudio definitivo del proyecto. Con este análisis se llegó a una serie de conclusiones y cuestionamientos de importancia los cuales se trataran de resolver en el transcurso de la investigación. La información seleccionada corresponde al sector del cañón del río Cauca, donde están emplazadas las obras del proyecto y, por ende, es la de mayor interés para el proyecto de investigación.
- Procesamiento de la información disponible sobre los ensayos de compresión simple y la descripción geotécnica de las perforaciones y núcleos de roca asociados. A partir de dicho procesamiento y teniendo en cuenta las bondades de la lógica difusa, se identificaron las características macroscópicas incluidas en la descripción de las muestras, que pudieran tener influencia en el valor de la compresión confinada obtenido en los ensayos de laboratorio.
- Análisis de resultados y elaboración del modelo de lógica difusa, incluyendo las respectivas funciones de pertenencia, que permitan determinar las variables necesarias para la obtención de un dato adecuado de resistencia confinada a partir de la descripción macroscópica de la masa de roca.

El resultado final es un modelo que permite realizar la estimación de la resistencia a la compresión confinada de la roca intacta, de manera continua, y a partir de información geológica básica y de fácil recopilación en el frente de excavación por parte del grupo de profesionales involucrados en el proyecto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general.

Obtener funciones de pertenencia que permitan estimar la resistencia a la compresión inconfiada de rocas metamórficas tipo gneis, en función de la descripción geológica detallada de campo.

1.1.2 Objetivos Específicos.

- Identificar las características macroscópicas cualitativas que pueden afectar la resistencia a la compresión inconfiada de los gneises del proyecto Ituango.
- Desarrollar una herramienta que permita mejorar el estimativo de las propiedades del macizo rocoso a partir de la recolección de datos cualitativos en el frente de trabajo.
- Complementar el conocimiento de las propiedades mecánicas del gneis del proyecto Ituango y su comportamiento ante la aplicación de cargas.

1.2 ALCANCE

Las funciones de membresía obtenidas permiten estimar la resistencia a la compresión inconfiada de rocas metamórficas emplazadas en el cañón del río Cauca, en la zona donde se vienen desarrollando las obras del proyecto hidroeléctrico Ituango, con una aproximación suficiente para la práctica profesional y la elaboración de modelos computacionales que permitan estimar el comportamiento del macizo rocoso en función de las excavaciones subterráneas ejecutadas.

1.3 MARCO TEÓRICO

Uno de los principales inconvenientes durante el diseño de proyectos de infraestructura, como es el caso de carreteras, cavernas subterráneas para proyectos de generación, fundación de presas o túneles de longitudes importantes es la limitada cantidad de exploración de campo y, por consiguiente, el número de ensayos de laboratorio que permitan determinar de forma precisa las características de los materiales a ser intervenidos por las obras civiles.

De acuerdo a lo indicado por Hoek E y Palmeiri A, 1998¹², en el caso de construcción de túneles de más de 1000 m de longitud, una cantidad inadecuada de perforaciones con recuperación de núcleo para la investigación geotécnica resulta en un aumento significativo en los costos del proyecto. Normalmente, este incremento está asociado a las condiciones inesperadas durante la ejecución de la obra que no pudieron ser anticipadas a partir de la exploración geotécnica realizada en la etapa de diseño.

En el caso de los túneles en zonas montañosas, esta situación es acentuada dada la imposibilidad de acceder a la proyección del alineamiento en superficie para llevar a cabo las perforaciones y/o tampoco es viable, física ni económicamente, realizar un gran número de perforaciones con la longitud suficiente para prospectar el macizo rocoso a la profundidad del túnel debido a las altas coberturas que se pueden tener. Por lo tanto, las condiciones geológicas y geotécnicas estimadas a partir de las perforaciones realizadas deben ser extrapoladas a las diferentes zonas del proyecto, condición que por la misma naturaleza de la información es aproximada y por lo tanto, solo puede utilizarse para inferir parámetros del macizo rocoso de manera general.

Una herramienta útil para el estimativo de las propiedades mecánicas de la roca, en función de su entorno geológico, son las bases de datos alimentadas a partir de exploración de campo directa ejecutada para el estudio de proyectos. Esta herramienta en el caso de los países desarrollados está controlada por entidades públicas encargadas de hacer seguimiento a las diferentes obras y de recopilar la información necesaria para enriquecer constantemente las bases de datos. En nuestro caso, ante la ausencia de una entidad con estas características, se hace necesario el análisis de los datos a partir de la información disponible en entidades privadas (normalmente empresas consultoras) o, en algunos casos, entidades públicas vinculadas directamente al desarrollo de proyectos de infraestructura de gran envergadura, como es el caso de las empresas generadoras de energía.

A partir de la información geológica recopilada e interpretada con base en los resultados de la exploración de campo, se deben estimar las características geotécnicas de los diferentes macizos rocosos intervenidos. La resistencia del macizo, deformabilidad y permeabilidad son los parámetros geotécnicos principales requeridos para el diseño de túneles, mientras que las características estructurales y la resistencia al corte de dichas estructuras son requeridos para el diseño de taludes en roca y túneles poco profundos, en los cuales la estabilidad estará controlada por la falla cinemática de elementos discretos.

Existen diferentes métodos disponibles para la clasificación del macizo rocoso en obras subterráneas, entre los cuales los más utilizados son el desarrollado por Barton N, Lien R y Lunde J ,1974¹ (Índice Q) y el Rock Mass Rating⁶ (RMR) desarrollado por Bieniawski, los cuales son herramientas ampliamente aceptadas para estimar las condiciones del terreno durante la excavación y proporcionar un dimensionamiento preliminar del soporte para ésta. Estos sistemas

utilizan información que puede ser recopilada a partir de levantamientos geológicos de superficie y la descripción de perforaciones con recuperación de núcleo. Adicionalmente, en el caso del proyecto Ituango, son utilizados para definir rangos característicos de comportamiento del macizo rocoso asignados a los diferentes tipos de soporte dimensionados durante la etapa de diseño. Además de estos métodos, para el análisis del comportamiento geomecánico de macizos rocosos también es de amplio uso la metodología del criterio de falla de Hoek-Brown, representado por el Geological Strength Index¹¹ (GSI), el cual permite inferir las propiedades del macizo rocoso a partir de las de la roca intacta, introduciendo el grado de libertad al movimiento asociado a la condición de fracturamiento y el estado de las discontinuidades del macizo.

Durante la etapa de construcción de las obras subterráneas se deben llevar a cabo tareas de refinamiento y ajuste a los parámetros obtenidos e inferidos durante las etapas previas del proyecto. El comportamiento general del macizo rocoso alrededor de las excavaciones solo puede ser entendido completamente cuando la obra ha sido finalizada. Dicho conocimiento se basa en el seguimiento y caracterización constante del frente de excavación, mapeos geológicos/estructurales y los resultados de la instrumentación instalada en el sitio.

Sin embargo, la recopilación de información de campo durante la ejecución de las obras está limitada a la descripción cualitativa del frente de excavación, enmarcada dentro de parámetros técnicos previamente establecidos, y al levantamiento cuantitativo de estructuras geológicas que permita establecer el nivel de fracturamiento de la masa de roca intervenida. La resistencia del macizo rocoso, cuya estimación se realiza a partir de la resistencia a la compresión confinada de la roca intacta (UCS) y el GSI, no es posible determinarlo a partir de la ejecución de ensayos rutinarios sobre muestras de roca, por lo que es necesario recurrir a intervalos de resistencia definidos en los métodos de clasificación de macizos rocosos (como es el caso del índice Q y el RMR), los cuales generalmente son amplios y no permiten una modelación adecuada de la masa de roca.

En el caso de rocas metamórficas como el gneis, en la literatura se encuentran rangos de resistencia a la compresión confinada (UCS) de entre 100 MPa y 250 MPa (Hoek E., Wood D. y Shah S. 1992¹⁰), mientras que los resultados de los ensayos realizados sobre muestras de roca procedentes de las perforaciones realizadas durante la etapa de exploración del proyecto Ituango, los valores de resistencia sugieren la variabilidad de este parámetro dentro de un mismo tipo de roca y su dependencia de factores externos como podrían ser la meteorización, profundidad de la muestra, afectaciones tectónicas, entre otros.

Por lo tanto, la elaboración de un modelo que permita estimar la resistencia a la compresión confinada del gneis en el cual están emplazadas las obras del proyecto Ituango, incorporando la influencia de las condiciones externas como lo son el grado de meteorización y la variabilidad textural de la roca asociada a su proceso de formación y grado de metamorfismo, se convierte en un elemento indispensable para el enriquecimiento y complementación de los modelos de comportamiento del macizo rocoso utilizados para el dimensionamiento de los elementos de soporte de las excavaciones subterráneas. Para esto, se buscó un procedimiento que permitiera convertir las descripciones cualitativas en resultados cuantitativos y se encontró que la herramienta que más facilidades proporcionaba para esta tarea era la lógica difusa (Fuzzy Logic).

Los sistemas de lógica difusa (Fuzzy systems – Fuzzy logic) han sido desarrollados en los últimos años buscando sustituir las tecnologías convencionales en muchas aplicaciones científicas y sistemas ingenieriles, especialmente en los sistemas de control y reconocimiento de patrones. Introducidos por Zadeh L.A., 1965²⁵ como una manera para representar la imprecisión de la lingüística. Pueden

ser considerados como la generalización de la teoría de conjuntos clásica. La idea general de los sistemas de lógica difusa radica en que, para un conjunto clásico (no difuso), un elemento del universo pertenece o no a este sistema. Esto es, la pertenencia de un elemento es “crisp” (o está en el sistema o no está en el sistema). Un sistema difuso es la generalización del sistema tradicional de una forma que permite un grado de pertenencia para cada uno de los elementos en un rango dentro de la unidad $[0,1]$. Por lo tanto, la función de pertenencia de un sistema difuso “mapea” cada elemento de un universo dentro del espacio de su rango. Una diferencia entre los sistemas tradicionales (crisp) y los sistemas difusos es que el primero tiene funciones de pertenencias únicas, mientras que el sistema difuso tiene un número infinito de funciones de pertenencia que lo pueden representar (Lin C.T y Lee G, 1996¹⁵).

2 ANTECEDENTES

El diseño y excavación de las obras subterráneas está íntimamente relacionado con las características mecánicas del medio rocoso que se va a intervenir. Una de estas características ampliamente utilizada en el ámbito ingenieril es la resistencia a la compresión inconfina de la roca intacta. La importancia de este parámetro radica en que es de fácil consecución (ensayos de laboratorio relativamente sencillos) y existe suficiente literatura que permite tener un estimativo general de su magnitud sin necesidad de tener datos directos.

Sin embargo, durante el diseño y planeación de una obra subterránea, normalmente el sitio de emplazamiento es inaccesible antes de comenzar la construcción. Ocasionalmente, se tiene la oportunidad de ejecutar galerías y/o pozos exploratorios que permiten identificar las características del entorno en el cual se ejecutarán los trabajos, pero la información recolectada no logra cubrir las variaciones de los parámetros de la roca en el entorno de los trabajos. Es por esto que la posibilidad de tener la resistencia a la compresión inconfina de la roca intacta a medida que se va desarrollando la excavación, a partir de la descripción cualitativa del macizo, permite ajustar los modelos, geometrías y recomendaciones de soporte impartidas para la excavación, adaptándolos a los diferentes entornos de esfuerzos y resistencia.

2.1 CONDICIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE EXCAVACIONES

SUBTERRÁNEAS

El diseño de excavaciones subterráneas se puede subdividir en dos componentes, los cuales se deben verificar por separado aunque no necesariamente en un orden específico. El primer análisis consiste en el chequeo de la falla de bloques en forma de cuñas o elementos discretos, situación a la cual normalmente se le refiere como falla cinemática. Para este análisis es primordial la caracterización del sistema de discontinuidades que componen el macizo rocoso y, además, las propiedades de los planos sobre los cuales se desarrollarán las fuerzas que deben tenerse en cuenta para verificar el grado de estabilidad propio de la excavación; sin embargo, las condiciones de resistencia de la masa de roca no son tenidas directamente en cuenta dentro del análisis.

El segundo componente que se debe verificar durante el diseño de las excavaciones subterráneas consiste en la estimación del comportamiento del macizo rocoso como un medio continuo ante las sollicitaciones de carga impuestas por el estado tensional al cual estará sometido y el cambio de este asociado al proceso de excavación.

Cuando los esfuerzos tangenciales alrededor de la excavación son mayores a aproximadamente la mitad de la resistencia a la compresión inconfina de la roca intacta, la masa de roca comienza a desarrollar fisuras en su interior. Esta condición es acentuada por el efecto del proceso de excavación alrededor de la apertura, el cual usualmente se produce algún fracturamiento y una zona de relajamiento cerca a la pared; sin embargo, las nuevas grietas pueden formar planos paralelos a la periferia. A grandes profundidades este tipo de falla puede provocar violentos “estallidos” conocidos como “Rock Bursting”.

En el caso de rocas débiles como los esquistos, esta condición de fracturamiento se puede alcanzar a bajas profundidades. Es más, el fracturamiento puede ser acelerado por el agua y el aire que

generan meteorización. La destrucción gradual de la resistencia de la roca propaga la zona fracturada hacia el macizo circundante (especialmente en las paredes), creando cargas en el sistema de soporte del túnel que pueden cerrar toda la excavación. Este fenómeno, llamado “squeezing” depende de la relación entre los esfuerzos iniciales y la resistencia inconfina de la roca, además de la durabilidad de esta última.

Existen dos tipos de comportamiento en este fenómeno, cuando la roca tiende a arquearse y los soportes pueden proporcionar suficiente carga para detener el deterioro progresivo, el desplazamiento de las paredes disminuirá con el tiempo y se llegará a un comportamiento asintótico estable. Si el soporte es instalado demasiado tarde, o si la roca transmite una carga demasiado alta para ser soportada por éste, los desplazamientos se acelerarán después de algún tiempo y, si no se toman las medidas correctivas adecuadas, el túnel fallará. En este tipo de roca es indispensable medir los desplazamientos de la roca en estaciones consecutivas dentro de la excavación y realizar los análisis de la información con rapidez.

2.2 MÉTODOS PARA CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS

Además del análisis directo de las condiciones de excavación para el diseño de las obras subterráneas, existen otras metodologías que permiten estimar las condiciones de soporte y excavabilidad a partir de recomendaciones básicas definidas mediante la revisión y recopilación de soluciones implementadas en proyectos de excavaciones subterráneas en diferentes condiciones geológicas y geográficas. Estos métodos empíricos permiten dimensionar de manera preliminar el soporte para un proyecto particular, así como definir una metodología que permita caracterizar el comportamiento del macizo rocoso a medida que se ejecuta el proyecto y poder recomendar los soportes dimensionados para rangos de comportamiento previamente definidos a partir de los análisis mencionados en el numeral anterior.

La finalidad de la clasificación geomecánica de macizos rocosos es obtener parámetros mecánicos para su empleo en el diseño de las obras de ingeniería. Los macizos rocosos, como medios discontinuos, presentan un comportamiento geomecánico complejo que, de una forma simplificada, puede ser estudiado y caracterizado en función de su aptitud para distintas aplicaciones. Las clasificaciones geomecánicas aportan mediante la observación directa de las características de los macizos rocosos y la realización de ensayos sencillos, índices de calidad relacionados con los parámetros y características del macizo, los cuales finalmente serán utilizados para determinar el sostenimiento y/o tratamiento en excavaciones subterráneas o superficiales.

Las principales características de los macizos rocosos que se consideran en las distintas clasificaciones son:

- Resistencia del material rocoso (roca intacta).
- Índice RQD.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Orientación de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Estructura geológica y presencia de fallas.
- Filtraciones y presencia de agua.
- Estado de esfuerzos.

Tal y como se mencionó en la introducción, las clasificaciones geomecánicas más utilizadas son el RMR (Rock Mass Rating) y el índice Q (método del NGI). La primera se emplea tanto para la caracterización de los macizos rocosos y sus propiedades como para su aplicación en túneles. El índice Q se emplea casi exclusivamente para túneles, siendo en este caso la metodología utilizada por el Diseñador del Proyecto para la clasificación y caracterización de los diferentes tipos de roca de las obras subterráneas.

La clasificación RMR fue desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, y constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índice de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y soporte en túneles. Los parámetros del macizo rocoso considerados en esta clasificación son:

- Resistencia a la compresión inconfiada de la roca intacta.
- Grado de fracturamiento en términos del RQD.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades respecto a la excavación.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso se expresa por medio del índice de calidad RMR, el cual varía de 0 a 100 (Tabla 1).

Tabla 1 – Clasificación de macizo rocoso mediante el índice RMR.

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
I	Muy buena	81-100	> 400	> 45
II	Buena	61-80	300 – 400	35 – 45
III	Media	41-60	200 – 300	25 – 25
IV	Mala	21-40	100 – 200	15 – 25
V	Muy mala	< 20	< 100	< 15

El índice Q, desarrollado por Barton N., Lien R. y Lunde J, 1974¹ a partir del estudio de un gran número de túneles, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos del macizo rocoso, así como estimar y diseñar soporte para excavaciones subterráneas. El índice Q está basado en una evaluación numérica de seis parámetros dados por la expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

J_n = índice de diaclasado que indica el grado de fracturamiento del macizo rocoso.

J_r = índice de rugosidad de las discontinuidades.

J_a = índice que indica la alteración de las discontinuidades.

J_w = coeficiente reductor por presencia de agua.

SRF (stress reduction factor) = coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Cada uno de los factores de la ecuación representa una característica mecánica del comportamiento del macizo rocoso. $\frac{RQD}{J_n}$ representa el grado de fracturamiento asociado al tamaño de bloque, $\frac{J_r}{J_a}$ la resistencia al corte entre los bloques y $\frac{J_w}{SRF}$ el estado de esfuerzos asociado al macizo rocoso.

El índice Q obtenido a partir de estos parámetros varía entre 0,001 y 1000, con la siguiente clasificación del macizo rocoso (Tabla 2)

Tabla 2 – Clasificación de macizo rocoso mediante el índice Q.

Rango Q	Calidad de la roca
0,001 – 0,01	Roca excepcionalmente mala (suelo)
0,01 – 0,1	Roca extremadamente mala
0,1 – 1	Roca muy mala
1 – 4	Roca mala
4 – 10	Roca media
10 – 40	Roca buena
40 – 100	Roca muy buena
100 – 400	Roca extremadamente buena
400 – 1000	Roca excepcionalmente buena

Aun cuando en los parámetros para el cálculo del índice Q no se encuentra directamente relacionada la resistencia a la compresión inconfiada, dicha propiedad está representada por el parámetro SRF, el cual considera en una de sus condiciones la relación entre la resistencia de la masa de roca y el estado de esfuerzos del macizo.

Bien sea para los métodos de clasificación de macizos rocosos (Q y RMR) o para la estimación de la envolvente de falla del macizo rocoso a partir del criterio de Hoek – Brown (Hoek E., Carranza-Torres C. y Corkum B, 2002¹³), la necesidad de contar con un valor de la resistencia inconfiada de la roca para la zona intervenida por el frente de excavación se hace indispensable dada la imposibilidad de estimarla de manera adecuada a partir de la literatura técnica disponible y normalmente asociada al tipo de roca presente en el proyecto Ituango. Como se mencionó anteriormente, los valores de resistencia obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio se encuentran por fuera de los rangos definidos típicamente para el gneis y su variación está asociada a condiciones externas además del componente geológico.

2.3 PROYECTO HIDRO-ITUANGO

El proyecto Hidroeléctrico Ituango está situado sobre el río Cauca, aproximadamente a 8 km aguas abajo del puente de Pescadero, sobre la carretera que conduce al municipio de Ituango. La distancia entre Medellín y el sitio de las obras es de 170 km por carretera.

Comprende una presa localizada inmediatamente aguas arriba de la desembocadura del río Ituango sobre el Cauca. Todas las obras que complementan el esquema están localizadas en la margen derecha del valle. Este es el macizo objeto de análisis en el presente trabajo.

La casa de máquinas alojará ocho grupos turbina – generador y sus equipos complementarios. Esta caverna tiene 49 m de alto, 23 m de ancho y 230 m de largo. El piso principal de la central está en la cota 217,5 msnm. El techo de roca en este sitio se encuentra entre los 350 m y 400 m.

El proyecto final, con 2400 MW de capacidad instalada, podrá producir durante su vida útil una energía promedio de 14000 GWh anuales y garantizará una energía firme anual de 8400 GWh.

2.3.1 Geología del proyecto.

El cañón del río Cauca divide las cordilleras Central y Occidental de los Andes colombianos, las cuales presentan marcadas diferencias desde el punto de vista de su evolución geológica y estructural. La cordillera Occidental tiene un origen marino, mientras que la cordillera Central presenta una evolución de tipo continental, representando dos diferentes terrenos alóctonos suturados a través del sistema de fallas Cauca – Romeral a finales del periodo Cretáceo (Restrepo y Toussaint, 1989¹⁹). Este hecho permite encontrar una gran variedad de tipos de roca y depósitos no consolidados; sin embargo, las obras principales del proyecto y particularmente, el macizo rocoso de interés para esta investigación, se localizan sobre una litología homogénea correspondiente a gneises esquistosos.

Los gneises, dado su protolito sedimentario, presentan una alta variabilidad textural en distancias muy cortas. Se encuentran desde rocas grueso granulares de bandas decimétricas que intercalan cuarzo y feldespato con biotita y anfíboles; hasta láminas milimétricas de grano fino con intercalaciones similares. Esta variabilidad textural fue tomada en cuenta para la identificación de características macroscópicas que permitieran establecer un patrón de comportamiento de la resistencia a la compresión confinada de la roca.

La foliación del gneis tiene rumbo aproximadamente N-S, con buzamiento general entre 20° y 30° E, aunque se presentan repliegues locales, que evidencian una amplia historia de afectación; a nivel de muestra de mano se pueden apreciar pliegues milimétricos, mientras que a nivel de afloramiento se presentan pliegues de gran apertura, que sin embargo no afectan por grandes extensiones la tendencia general de buzamiento Este.

2.3.2 Geomorfología local.

En el sector de las obras el cañón del río Cauca se caracteriza por su estrechez y sus vertientes empinadas, describiendo un valle de sección típica en “V” ligeramente asimétrico, con su flanco derecho más empinado que el izquierdo, rasgo directamente relacionado con la disposición de las estructuras de foliación de las rocas metamórficas en que se encuentra entallado. El río Cauca transcurre por el fondo del cañón con un gradiente aproximado de 0,025° y una amplitud media de 70 m, inicialmente con una dirección N10°E que se transforma gradualmente en N70°E,

especialmente a partir de la desembocadura del río Ituango. Las vertientes que encajan el sitio de la presa y las demás obras presentan más de 1000 m de altura, con una forma convexa que gana en inclinación a medida que se aproxima al fondo del cañón.

Las pendientes de la zona de las obras se clasifican como fuertes, con valores mayores a 45° con varios segmentos verticales, con predominio de afloramientos rocosos. Se extiende principalmente por la margen derecha del río. Pendientes entre 30° y 45° se encuentran en buena parte de la margen izquierda, con presencia de abundantes bloques rocosos en superficie. Finalmente, pendientes inferiores a 30° se encuentran en la parte superior de la vertiente derecha del río, con desarrollo de suelos residuales.

2.3.3 Características estructurales.

La principal característica estructural del macizo rocoso la constituye los planos de debilidad generados por la foliación, de tendencia general N10°-30°E/15°-30°SE, aunque ocasionalmente y por procesos puntuales tales como plegamiento, el buzamiento varía.

Además de ser el principal sistema de diaclasas, esta estructura ha permitido la liberación de esfuerzos que se han traducido en zonas de cizalla paralelas a los mismo, los cuales se encuentran de manera aleatoria y con diversas persistencias, a todo lo largo de las vertientes estudiadas, y se caracterizan por su escaso espesor centimétrico y pinchamiento súbito.

Los sistemas estructurales predominantes son:

- Sistema estructural de discontinuidades correspondiente a la foliación. Este sistema es el de mayor continuidad, menor espaciamiento promedio y mayor persistencia. La rugosidad varía con la textura, cuando compromete material de grano fino es lisa, mientras que en sectores grueso – granulares es rugosa, en ambos casos desde planar hasta ondulada.
- Sistema dirección NS con buzamientos subverticales, siempre convergiendo hacia el río Cauca. Este sistema define las paredes del cañón y controla el cauce del río.
- Sistema de importancia menor con dirección EW, con buzamientos verticales a subverticales y sirve de control de los cauces y caños del sector: qda. Tenche, Burundá y otros menores.
- Un sistema con dirección NS y buzamiento 60°W que controla la caída de bloques en la margen derecha del río.

Desde el trabajo de factibilidad se registra la presencia de un par de fallas menores de alto ángulo, aflorantes sobre la margen derecha y transversales a la dirección del río. Presentan las siguientes características:

- La falla Tocayo es una falla que cruza la foliación, con una disposición aproximada general N70°W/65°SW y un espesor que varía entre 1 m y 3 m; su expresión geomorfológica es baja a moderada y aflora en varios sitios del caño del cual toma su nombre.
- La falla los Mellizos cruza la foliación, con disposición general N50°-70°E/60°-70°SE y se reconoce en varios sitios del cauce de la quebrada del mismo nombre, con un espesor de entre 3 m y 10 m de cizallamiento directo. Su expresión geomorfológica es mayor que la de la falla Tocayo.

Estas condiciones estructurales, identificadas en la zona de las obras del proyecto, representan una fuente más de afectación a las condiciones de resistencia de la masa de roca, generando sectores de mayor fracturamiento los cuales se convierten en caminos preferenciales para el flujo de agua, trasladando los efectos de meteorización presentes en la porción superficial de la ladera a zonas

profundas del macizo rocoso donde estas condiciones no serían de esperarse; bandas de cizalla con rellenos de materiales blandos concordantes con la foliación y, en algunos casos, con una disposición que la corta, generando sectores de resistencia inferior a los valores típicos definidos para este tipo de roca, condición asociada en algunos casos a niveles de foliación más intensos, asimilándose texturalmente a esquistos.

Por lo tanto, estas características particulares asociadas al macizo rocoso en estudio, son consideradas y analizadas dentro de los factores que influyen en la resistencia a la compresión inconfiada de la roca y así poder elaborar el modelo de lógica difusa que permita estimarla de manera adecuada para el gneis de Ituango.

En la Figura 1 se presenta la disposición general de las obras principales del proyecto, las cuales se encuentran concentradas en la margen derecha del río Cauca, en el sitio de desembocadura del río Ituango sobre este.



Figura 1 – Disposición general de las obras del proyecto – margen derecha.

2.4 ESTADO DEL ARTE

El uso de modelos de lógica difusa para inferir las propiedades mecánicas básicas de la roca intacta ha sido implementado desde finales del siglo pasado. Alvarez Grimmer M y Babuska R, 1999¹ proponen un modelo que permite inferir la resistencia a la compresión inconfiada de muestras de roca a partir de propiedades índice como la densidad y porosidad, además del parámetro L obtenido a partir de la ejecución del ensayo de dureza Equotip o EHT (Equotip Hardness Tester). El método de lógica difusa utilizado para la elaboración del modelo fue el Takagi-Sugeno.

Posteriormente, Gokceoglu C., 2002⁸, presentó el documento denominado “Cartilla triangular para predecir la resistencia a la compresión inconfiada de los aglomerados de Ankara a partir de su composición petrográfica”, en el cual se muestra una metodología que permite, a partir de una simple clasificación de imágenes para determinar el porcentaje de la mineralogía para diferentes muestras de aglomerado. El resultado de este trabajo fue una cartilla compuesta por 25 sub-caracterizaciones triangulares de las diferentes composiciones petrográficas, expresadas en términos de reglas de lógica difusa tipo condicional.

La lógica difusa también ha sido implementada en la optimización de los métodos utilizados para la clasificación de macizos rocosos, como es el caso del “Rock Mass Rating – RMR”⁶. Aydin A., 2004³ realizó un acercamiento de este tipo, permitiendo evaluar la calidad de la masa de roca en función de cualquiera de los criterios incluidos en la metodología de clasificación de macizos rocosos. Para reducir la incertidumbre debida al tipo de proyecto y a una litología específica, las funciones de membresía fueron formuladas considerando excavaciones subterráneas superficiales (<200 m) en macizos de roca granítica.

Sonmez H., Tuncay E. y Gokceoglu C., 2004²³, continuaron con la implementación de modelos de lógica difusa para inferir características mecánicas de las rocas asociadas al aglomerado de Ankara. Es así como desarrollaron un modelo para estimar la resistencia a la compresión inconfiada y el módulo de elasticidad, en función de la porción volumétrica asociada a bloque en muestras del aglomerado. La necesidad de dicho modelo radica en la imposibilidad de preparar de manera adecuada y sistemática núcleos de roca representativos del aglomerado de Ankara, para la ejecución de ensayos de laboratorio, debido a la composición de “bloques dentro de matriz” típica de esta formación. Para la elaboración del modelo se utilizó el algoritmo Mamdani.

La implementación de la lógica difusa para la estimación de parámetros mecánicos de geomateriales y la clasificación de macizos rocosos continuó con el trabajo elaborado por Bashari A., Beiki M. y Talebinejad A., 2011⁵, quienes desarrollaron un modelo, a partir de una base de aproximadamente 120 datos correspondientes a diferentes galerías y sitios de presa, para la estimación del módulo de deformación de macizos rocosos utilizando el método Takagi – Sugeno. Inicialmente, la información obtenida a través de agrupaciones difusas fue utilizada para definir el número de reglas y las funciones de membresía iniciales para, posteriormente, aplicar estimaciones mediante mínimos cuadrados y obtener los parámetros de salida del modelo difuso. Adicionalmente, se implementó un sistema de inferencia neuro – difuso, para mejorar el comportamiento generalizado de las funciones de membresía.

Mishra D.A., Basu A., 2013¹⁷, realizaron la verificación de la eficacia de diferentes ensayos índice y otras técnicas de análisis, como el caso de la lógica difusa, para predecir la resistencia a la compresión confinada de granitos, esquistos y areniscas. La resistencia a la compresión confinada (UCS), ensayo de carga puntual, martillo Schmidt, velocidad de onda P a partir de ultrasonido y propiedades físicas como la porosidad efectiva y la densidad, fueron determinadas para las rocas objeto del análisis. Tanto la metodología de regresiones múltiples como el sistema de inferencia difuso, presentaron mejores características predictivas para la UCS que los análisis de regresión simple. Finalmente, el sistema de inferencia difuso mostró ser una herramienta eficiente para predecir la resistencia a la compresión confinada de la roca a partir de las propiedades índice, debido a la capacidad de manejar con eficiencia la incertidumbre propia de los resultados de laboratorio.

El mismo enfoque del trabajo anterior fue motivo del documento presentado por Yesiloglu-Gultekin N., Gokceoglu C. y Sezer E.A, 2013²⁴, donde abordaron diferentes modelos para predecir la resistencia a la compresión confinada para seis diferentes rocas graníticas emplazadas en Turquía. Los métodos analizados fueron regresión múltiple, redes neuronales artificiales y sistema de inferencia adaptativo neuro difuso.

Por último, Ozturk C.A. y Nasuf E., 2013¹⁸, desarrollaron su investigación cuyo principal objetivo fue clasificar los materiales en función de su coeficiente de textura (TC), estimado a partir del análisis de imágenes de secciones delgadas, a través del dominio binario y difuso. El parámetro TC es dividido en cinco categorías desde muy bajo a muy alto, y un modelo de lógica difusa es propuesto para predecir la resistencia de la compresión confinada.

3 ESTRUCTURACIÓN Y ELABORACIÓN DEL MODELO

3.1 MODELO DE LÓGICA DIFUSA

Actualmente, existe la tendencia a establecer un nuevo campo de la ciencia de la computación que integra diferentes métodos de solución de problemas que no pueden ser resueltos mediante un enfoque algorítmico tradicional. Estos métodos tienen su origen en la emulación de los sistemas biológicos, se trata de nuevos procedimientos que permiten manejar las impresiones de incertidumbres que se presentan al resolver un problema, proporcionando soluciones robustas y de fácil implementación. Entre estos procedimientos están los algoritmos genéticos, la teoría del aprendizaje, el razonamiento aproximado y la lógica difusa, entre otros.

Los sistemas de lógica difusa (Fuzzy systems – Fuzzy logic) han sido desarrollados en los últimos años buscando sustituir las tecnologías convencionales en muchas aplicaciones científicas y sistemas ingenieriles, especialmente en los sistemas de control y reconocimiento de patrones. Introducidos por Zadeh L.A., 1965²⁵ como una manera para representar la imprecisión de la lingüística. Pueden ser considerados como la generalización de la teoría de conjuntos clásica. La idea general de los sistemas de lógica difusa radica en que, para un conjunto clásico (no difuso), un elemento del universo pertenece o no a este sistema. Esto es, la pertenencia de un elemento es “crisp” (o está en el sistema o no está en el sistema). Un sistema difuso es la generalización del sistema tradicional de una forma que permite un grado de pertenencia para cada uno de los elementos en un rango dentro de la unidad [0,1]. Por lo tanto, la función de pertenencia de un sistema difuso “mapea” cada elemento de un universo dentro del espacio de su rango. Una diferencia entre los sistemas tradicionales (crisp) y los sistemas difusos es que el primero tiene funciones de pertenencias únicas, mientras que el sistema difuso tiene un número infinito de funciones de pertenencia que lo pueden representar (Lin C.T y Lee G, 1996¹⁵).

En términos prácticos, es una técnica que permite trasladar aseveraciones del lenguaje natural a la formalidad matemática. Trabaja con conjuntos que no tienen límites perfectamente definidos a través de funciones de pertenencia y, por lo tanto, dan flexibilidad a la modelación. Estos sistemas, también llamados borrosos, han demostrado su utilidad en variedad de aplicaciones no solo en el reconocimiento de patrones sino también en asuntos ingenieriles²¹.

Para la elaboración del modelo, se utiliza el algoritmo Mamdani para representar las relaciones de las diferentes características físicas respecto a la resistencia a la compresión inconfina de la roca, siendo su bondad la capacidad de ajustarse de forma adecuada a la representación de problemas geológicos ingenieriles (Alvarez Grima, 2000¹). La estructura general tipo condicional “if-then” de este algoritmo es la siguiente:

R_i : si x_i es A_{il} y ...

Entonces y es B_i (para $i = 1, 2, \dots, k$),

Donde k es el número de reglas, x_i es la variable de entrada y y es la variable de salida.

Aunque existen muchos métodos para la composición de relaciones borrosas o difusas (por ejemplo min-max, max-max, min-min, max-media, entre otras) los métodos max-min y max-producto son las dos técnicas más empleadas comúnmente. La forma básica de la composición de un proceso de lógica difusa está dada por la siguiente expresión (Sonmez H., Gokceoglu C. y Ulusay R, 2003²²):

$$B = A \odot R,$$

Donde A es la variable de entrada definida en el universo X , B es la variable de salida definida en el universo Y , y R es la condición difusa que caracteriza la relación entre entradas específicas (x) y salidas específicas (y).

Las siguientes etapas son los componentes del algoritmo de inferencia Mamdani (Alvarez Grima, 2000¹):

- (1) Calcular el grado de cumplimiento α_i de la variable de entrada para cada regla i considerando el grado de membresía (μ):

$$\alpha_i = \mu_{A_{i1}}(x_1) \wedge \mu_{A_{i2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{in}}(x_n) \quad 1 \leq i \leq k$$

- (2) Para cada regla derivar el conjunto difuso de salida B_i usando la t-norma:

$$\mu_{B_i}(y) = \alpha_i \wedge \mu_{B_i}(y)$$

- (3) Agregar los conjuntos difusos de salida mediante el máximo

$$\mu_{B_i}(y) = \max_{i=1,2,\dots,k} (\mu_{B_i}(y))$$

El sistema de inferencia basado en la lógica difusa debe ser estructurado para estimar los valores de compresión inconfiada en función de las variables de entrada. Existen varios métodos para la asignación de los valores de membresía (también llamados grados de pertenencia o “pesos”) tales como intuición, inferencia, ordenamiento jerárquico, conjuntos difusos angulares, redes neuronales, algoritmos genéticos, razonamiento inductivo, meta reglas, estadísticas difusas, entre otros. Para el caso de este modelo, el método intuitivo fue el escogido para la asignación de los valores de membresía ya que permite realizar dicha actividad sin la necesidad de tener una introducción al tema de manera específica. Este método se basa en la capacidad de los humanos para desarrollar funciones de membresía a partir de su propio entendimiento y razonamiento.

El sistema difuso, está compuesto básicamente por tres (3) bloques, el primero llamado bloque difusor, en el cual se definen las variables de entrada que alimentarán el sistema y servirán para estructurar las funciones de pertenencia de cada una de estas. Este bloque será alimentado por las características físicas que, identificadas a partir del análisis de los resultados de los ensayos de compresión inconfiada, tengan una participación importante en la magnitud de esta, definiendo su variación en función de los rangos identificados y su respectiva función de pertenencia (Figura 2).

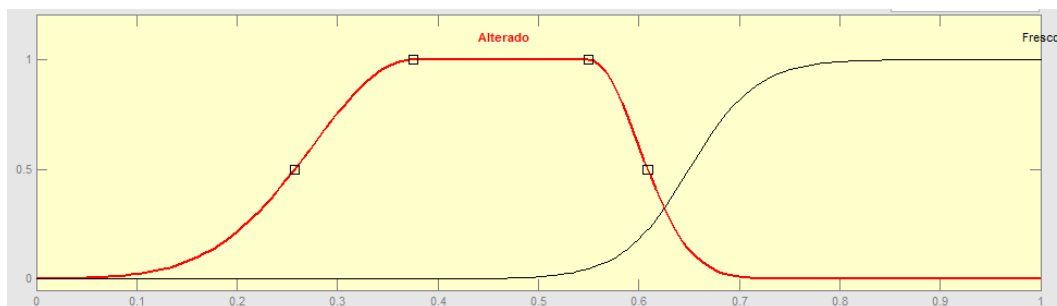


Figura 2 – Función de pertenencia típica para las variables de entrada del modelo

El segundo bloque es el de inferencia, en el cual se definen todas las relaciones posibles entre las variables de entrada mediante las relaciones tipo “if-then” propias del algoritmo Mamdani. Una vez definidas las posibles relaciones existentes entre las variables de entrada del modelo, se deben analizar las condiciones de salida asociadas a cada una de ellas, ajustando los pesos asignados a las diferentes variables y asignando un intervalo de salida correspondiente al valor de compresión inconfundida estimado para cada una de ellas.

En el tercer bloque, llamado de salida o desfudor, se definen los conjuntos de resistencia a la compresión inconfundida, con sus respectivas funciones de membresía, para cada una de las reglas que relacionan las posibles combinaciones de las variables de entrada del modelo. Finalmente, se convierten los diferentes pesos obtenidos a partir de estas reglas y las operaciones propias del algoritmo Mamdani para obtener el resultado de la variable objetivo previamente establecida.

3.2 REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

La gran cantidad de información disponible del sitio de estudio permite recolectar los datos necesarios para el desarrollo del análisis de las propiedades mecánicas del macizo rocoso. Esta información se ha consolidado a través de empresa privadas de ingeniería por solicitud de los Entidades dueñas del proyecto. Los trabajos de factibilidad se desarrollaron de 1978 a 1982, e incluyeron una extensa campaña de exploración.

Entre los años 2006 y 2007 se hizo una actualización de los estudios de factibilidad, en la cual se revisó la información de la etapa anterior y se realizó un nuevo programa de exploración y levantamientos de campo.

En la etapa de diseño definitivo, llevada a cabo entre los años 2009 y 2010, se desarrolló una nueva campaña exploratoria que incluyó perforaciones, galerías, apiques, pozos o pilas, refracción sísmica y ensayos de campo, además de la geología de destalle superficial. En la Tabla 3 se presenta el resumen de la exploración de campo.

Tabla 3 – Resumen exploración de campo etapa de diseño definitivo – Proyecto Ituango.

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD
Perforación rotatoria	m	3770,19
Galerías	m	1007,45
Líneas de refracción	Líneas	78
Pozos exploratorios	m	264
Apiques	m ³	67
Trincheras	m ³	30
Perforaciones a percusión	m	250

Después de este recuento de la información existente inherente al proyecto, es evidente la importancia de llevar a cabo la revisión de todos los datos técnicos que fueron recolectados en el proceso de estudios y diseño.

Con el fin de evitar incluir apreciaciones propias de los diseñadores, se solicitó al dueño del proyecto la autorización para utilizar la información básica recopilada, es decir, los registros de perforaciones, los núcleos de perforaciones recuperados, la información de mapeo geológico sin procesar, para así identificar y planear los trabajos con fines investigativos que se deben llevar a cabo sobre todos estos datos.

En cuanto a ensayos de laboratorio, debido a la naturaleza del proyecto y a la información necesaria para elaborar un modelo de lógica difusa, se buscaron los resultados de cargas puntuales, compresiones inconfiadas y compresiones triaxiales. De estos tres ensayos, la mayoría de los resultados corresponden a compresiones inconfiadas, por lo que los resultados de esta prueba se utilizaron para elaborar una aproximación a las características geomecánicas de la roca intacta.

3.3 REVISIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO EXISTENTES

De la información suministrada por Empresas Públicas de Medellín (EPM), se realizó la revisión y selección de los datos correspondientes a los ensayos de compresión inconfiada realizados sobre los núcleos de roca obtenidos de las perforaciones ejecutadas durante el programa de exploración desarrollado en la etapa de estudio definitivo del proyecto.

Después de revisar la información, se encontraron 77 datos de ensayos ejecutados válidos (hay información de otros ensayos adicionales que fueron descartados debido a particularidades al momento de hacer la prueba); de estos 77 datos, para el análisis fueron seleccionados 62 puntos. Por lo tanto, las 15 muestras restantes fueron utilizadas como datos de control con el fin de verificar la validez del modelo una vez elaborado a partir del análisis realizado sobre las 62 muestras iniciales.

El motivo por el cual no se consideraron algunos ensayos para la elaboración del modelo fue debido a que, al momento de revisar las fotografías de cada una de las muestras, antes y después del ensayo, se encontró que algunas de ellas presentaban defectos en su estructura antes de ser sometidas a carga, siendo posible identificar a simple vista fracturas pre-existentes que evidentemente afectaban el resultado final del ensayo (Foto 1 y Foto 2).

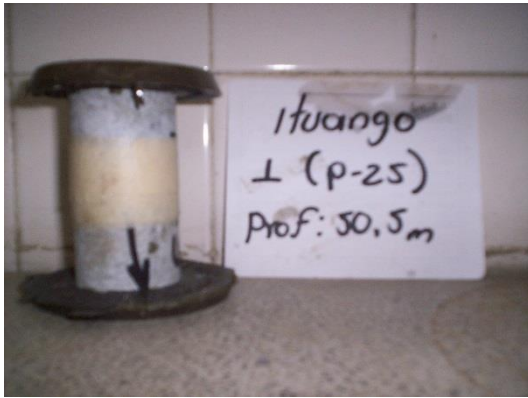


Foto 1 – Muestra P25-M1 con agrietamientos antes de realizar el ensayo.

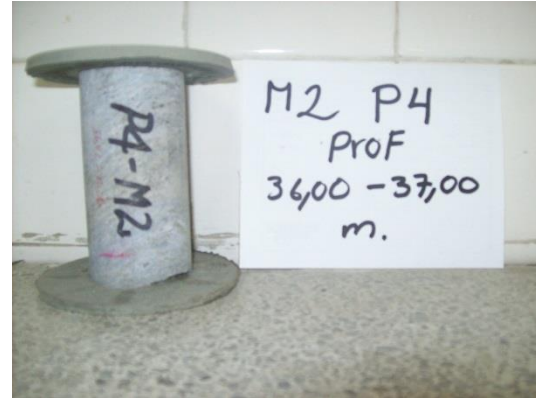


Foto 2 – Muestra P4-M2 despicada en la parte inferior antes de realizar el ensayo.

Una vez hecha la selección de los ensayos pertinentes para la investigación, se procedió a hacer su clasificación teniendo en cuenta la perforación de la cual se tomó el núcleo de roca, la profundidad respecto a la superficie, el horizonte de roca al cual está asociado y la ubicación espacial dentro de las obras principales del proyecto. En la Tabla 4 se presenta el número de ensayos considerados para la elaboración del modelo y los utilizados para su posterior validación, en función de la distribución espacial de las obras.

Tabla 4 – Distribución de ensayos de compresión simple de acuerdo a las obras del proyecto hidroeléctrico.

Perforación	Sector	N° de ensayos (Análisis)	N° de ensayos (Validación)
P-1	Pozo de impacto - Vertedero	3	-
P-3	Salida túneles descarga	1	-
P-4	Salida túneles descarga	2	-
P-5	Salida túneles descarga	1	-
P-6	Salida túneles descarga	2	-
P-7	Pozo de impacto - Vertedero	-	1
P-9	Talud derecho - Vertedero	2	1
P-11	Casa de Máquinas (Galería 3)	1	-
P-15	Estribo izquierdo - Presa	2	1
P-16	Estribo izquierdo – Presa (eje)	7	1
P-17	Estribo izquierdo - Presa	2	1
P-18	Estribo izquierdo - Presa	2	1
P-19	Estribo izquierdo - Presa	1	-
P-21	Estribo derecho - Presa	2	-
P-22	Estribo derecho - Presa	3	1
P-23	Estribo derecho - Presa	2	1
P-24	Estribo derecho - Presa	1	-
P-25	Estribo derecho – Presa (eje)	4	-
P-27	Estribo izquierdo - Presa	1	-
P-29	Estribo derecho - Presa	1	-
P-30	Estribo derecho - Presa	-	1

Perforación	Sector	N° de ensayos (Análisis)	N° de ensayos (Validación)
P-31	Portal entrada - Desviación	1	-
P-32	Portal entrada - Desviación	1	-
P-33	Portal entrada - Desviación	3	-
P-34	Talud derecho - Vertedero	3	1
P-35	Estribo izquierdo – Presa (eje)	2	1
P-36	Estribo izquierdo – Presa	3	-
P-38	Estribo izquierdo – Presa (eje)	-	1
P-39	Estribo derecho - Presa	3	-
P-41	Estribo derecho – Presa (eje)	1	1
P-42	Estribo derecho – Presa (eje)	-	1
P-44	Casa de Máquinas	2	1
P-49	Portal entrada - Desviación	2	-
P-50	Talud derecho - Vertedero	1	-

Para complementar los ensayos de laboratorio seleccionados, se determinó el módulo tangente al 50% de la resistencia última, el cual permite hacer la clasificación del material en función del módulo relativo⁷ ($E_{t50\%}/UCS$). Los resultados del cálculo del módulo relativo se presentan en la Tabla 5 y la Figura 3 asociada. La mayoría de los datos se encuentran en el rango bajo de módulo relativo (según metodología propuesta por Deere D. y Miller R.D. 1966⁷) ($Mr < 200$). Para los rangos bajo y medio ($200 < Mr < 500$) el aporte de datos de margen izquierda y margen derecha es básicamente el mismo, siendo en el rango bajo un 68% de los datos provenientes de la margen derecha y un 32% de datos de la margen izquierda. Para el rango medio el aporte es de 66% de la margen derecha y 34% de la margen izquierda.

Tabla 5 - Modulo Relativo (Mr) separado por estribos.

	Margen Izquierda	Margen Derecha
Promedio	193,4	224,0
Media	181,4	201,2
Mediana	164,8	174,4
Desviación	83,1	120,4
Máximo	447,8	649,9
Mínimo	106,5	113,5

Además, para observar el comportamiento del módulo relativo se analizó la variación del módulo de elasticidad $E_{t50\%}$, el Mr y la resistencia a la compresión inconfiada con la profundidad. En la Figura 4, Figura 5 y Figura 6 se presenta dicho comportamiento en función de la profundidad de los parámetros indicados.

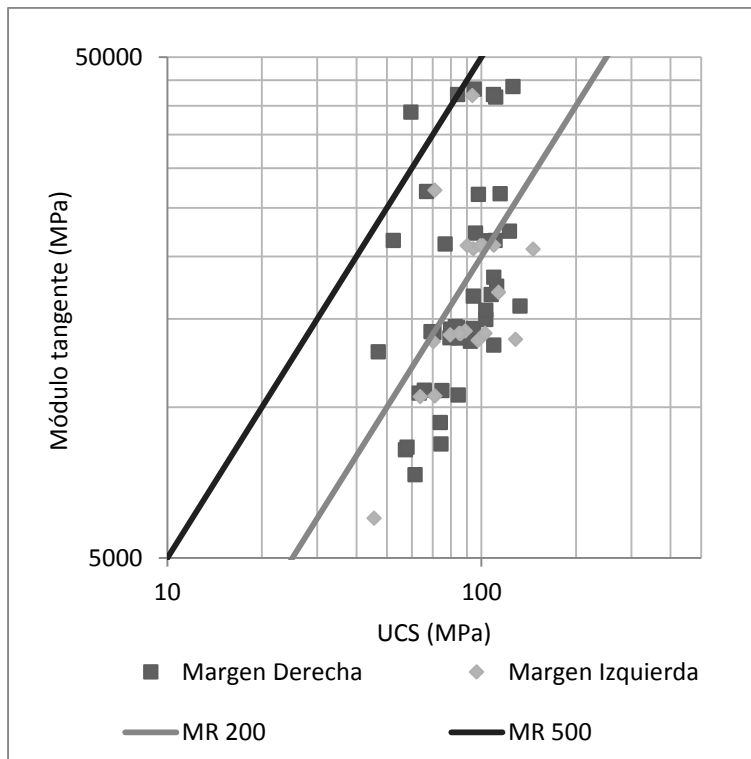


Figura 3 – Módulo tangente 50% del esfuerzo máximo vs. Compresión inconfiada.

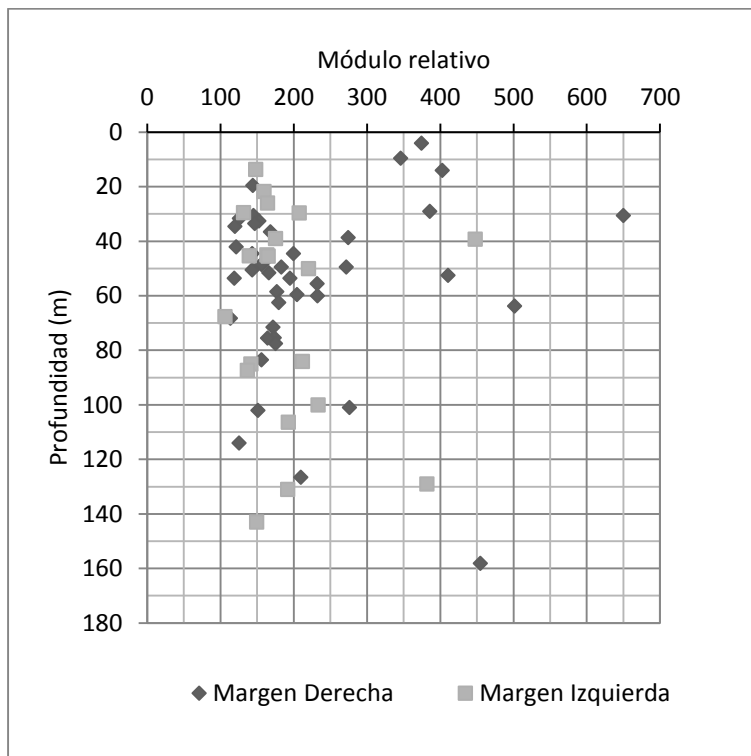


Figura 4 – Módulo relativo vs. Profundidad.

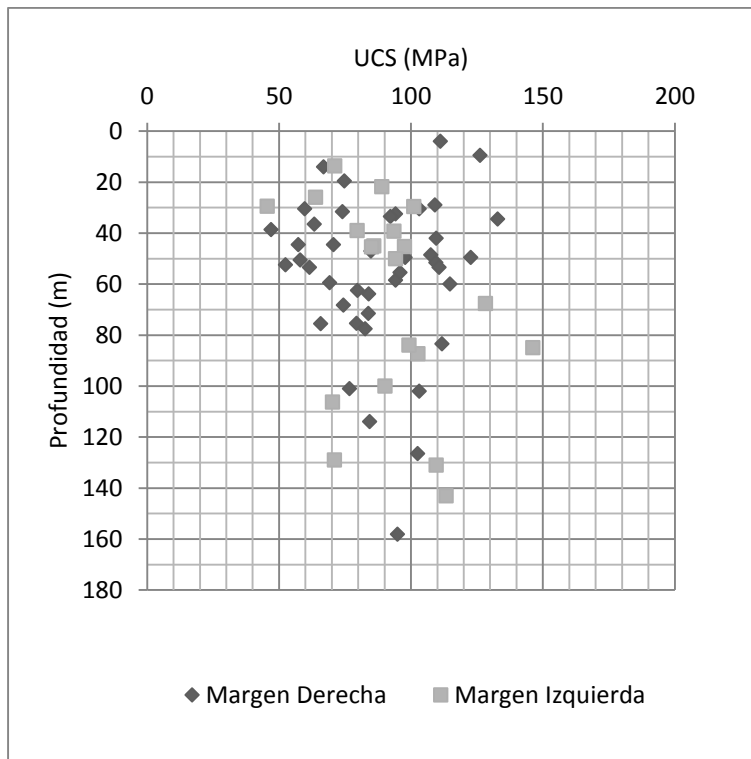


Figura 5 – Compresión inconfiada vs. Profundidad.

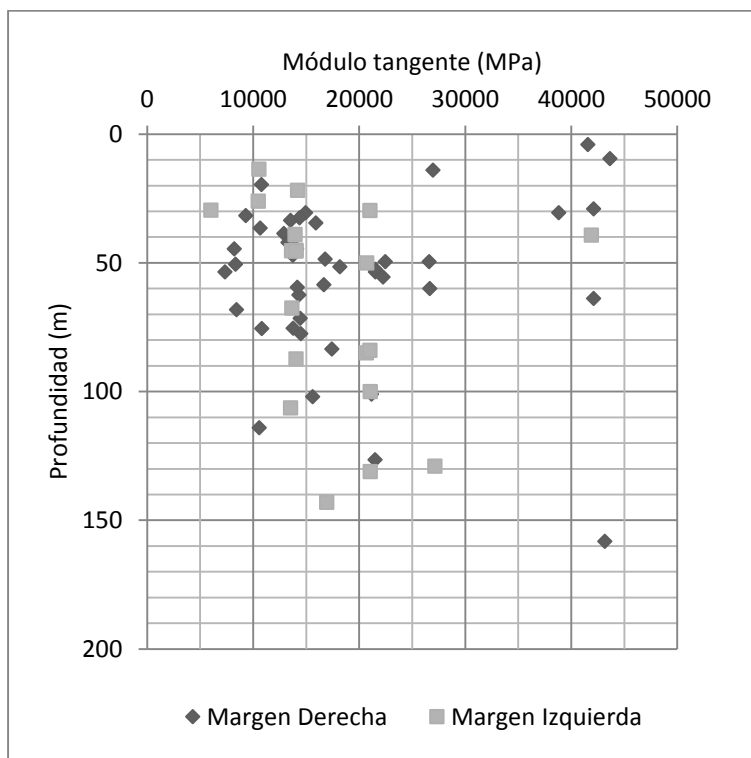


Figura 6 – Módulo tangente vs. Profundidad.

Llama la atención en la Figura 4 la concentración de datos, tanto de margen derecha como de margen izquierda, alrededor del módulo relativo promedio de 200; sin embargo, no se observa una tendencia relacionada a la variación de profundidad de las muestras. Se puede observar otro grupo de muestras concentrado sobre un módulo relativo de 400, aunque con la misma tendencia independiente de la profundidad de las muestras. En el caso de la Figura 5, la dispersión de los datos de compresión inconfiada es una evidencia clara de la independencia de este parámetro de resistencia respecto a la posición de la muestra dentro del macizo rocoso.

En el caso del módulo tangente ($E_{t50\%}$), se presenta un comportamiento similar al del módulo relativo, donde se identifican dos grupos de muestras concentradas en un primer grupo entre 10 GPa y 20 GPa, y un segundo grupo alrededor de 40 GPa. Este comportamiento no se puede relacionar con factores tales como profundidad ni localización, por lo que requiere buscar una explicación a través de la geología y características puntuales de la masa de roca.

Ante la imposibilidad de establecer una tendencia asociada a la posición espacial de las muestras dentro del proyecto, se llegó a la necesidad de identificar parámetros físicos que permitieran estimar la resistencia inconfiada, con base en una valoración visual. Para esto, se pasó a la revisión de cada muestra y con el fin de identificar y seleccionar las características físicas a partir de las cuales se pudieran establecer las funciones de pertenencia asociadas a un modelo de lógica difusa que permita estimar la resistencia de la compresión inconfiada a partir de la descripción macroscópica de la muestra.

3.4 PROCESAMIENTO DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE, DESCRIPCIÓN DE PERFORACIONES Y DEFINICIÓN DE VARIABLES.

Después de revisar la información disponible de ensayos de laboratorio para el proyecto Hidroeléctrico Ituango y observar que no es posible definir una tendencia general, para inferir la resistencia mecánica, asociada a la disposición espacial de las muestras en el ámbito del proyecto, se procedió al análisis descriptivo de los núcleos ensayados, tomando como punto de partida la descripción geológico/geotécnica realizada durante la etapa de diseño definitivo. Es en este punto, en el cual se debe manejar la descripción cualitativa y la ambigüedad propia del lenguaje utilizado para dicha descripción, es donde la herramienta de la lógica difusa permitirá establecer diferentes niveles de pertenencia para las variables identificadas en el análisis, con el fin de obtener un resultado aceptable para la resistencia confinada estimada para una muestra de roca.

A continuación se presentan cada uno de los pasos desarrollados para llegar a la definición de las variables utilizadas para la estructuración del modelo:

- Se realizó la revisión de todas las gráficas de esfuerzo vs deformación de los ensayos utilizados, sub-dividiéndolas en nueve (9) grupos conformados con muestras seleccionadas de manera aleatoria, con el fin de facilitar el análisis del comportamiento de cada una de ellas, para posteriormente agruparlas de acuerdo a las tendencias identificadas y así proceder a establecer los rasgos comunes para cada uno de los grupos obtenidos. Esta subdivisión estuvo asociada a la rigidez del material (pendiente de la curva esfuerzo-deformación) y a la resistencia última a la compresión confinada.

Sabiendo que el parámetro objeto de la investigación es la resistencia a la compresión confinada de la roca intacta (UCS), el análisis de cada uno de los grupos se realizó buscando identificar muestras con valores enmarcados en rangos claramente definidos. Es así como en el grupo 1 (Figura 7) las muestras se dividen en dos rangos, el primero con valores aproximadamente 100 MPa, mientras que el segundo los valores de resistencia son de aproximadamente 60 MPa. En el caso del grupo 2 (Figura 8) se observa una mayor amplitud en el rango de resistencia confinada, aproximadamente entre 60 MPa y 120 MPa, y condiciones de rigidez similares para todas las muestras; el grupo 3 (Figura 9) se concentra en un rango entre 60 MPa y 80 MPa, con algunas muestras sobre los 100 MPa; el grupo 4 (Figura 10) presenta dos concentraciones, la primera alrededor de los 90 MPa y la segunda entre los 60 MPa y 80 MPa; el grupo 5 (Figura 11) presenta concentraciones entre 60 MPa y 80 MPa, con algunas muestras con resistencia por debajo de los 50 MPa. Para los grupos 6 (Figura 12) se tienen concentraciones entre 110 MPa y 130 MPa, y entre 80 MPa y 100 MPa. El grupo 7 (Figura 13) presenta una amplia dispersión entre 60 MPa y 100 MPa, mientras que el grupo 8 (Figura 14) presenta valores de resistencia entre 120 MPa y 140 MPa, para finalmente encontrar en el grupo 9 (Figura 15) una concentración de valores entre 80 MPa y 100 MPa. En la Tabla 6 se presenta el resumen del análisis de las diferentes gráficas esfuerzo vs deformación.

Tabla 6 – Resumen de análisis de tendencias

Grupo	Figura	Rango UCS (MPa)
1	Figura 7	60 – 100
2	Figura 8	60 – 120
3	Figura 9	60 – 80
4	Figura 10	60 – 90
5	Figura 11	60 – 80
6	Figura 12	80 – 130
7	Figura 13	60 – 100
8	Figura 14	120 – 140
9	Figura 15	80 – 100

Esta primera aproximación al análisis del comportamiento de las diferentes muestras ensayadas, permite filtrar los resultados en función de su valor de resistencia para así proceder a identificar características físicas comunes y definir las variables que conformarán el modelo de lógica difusa.

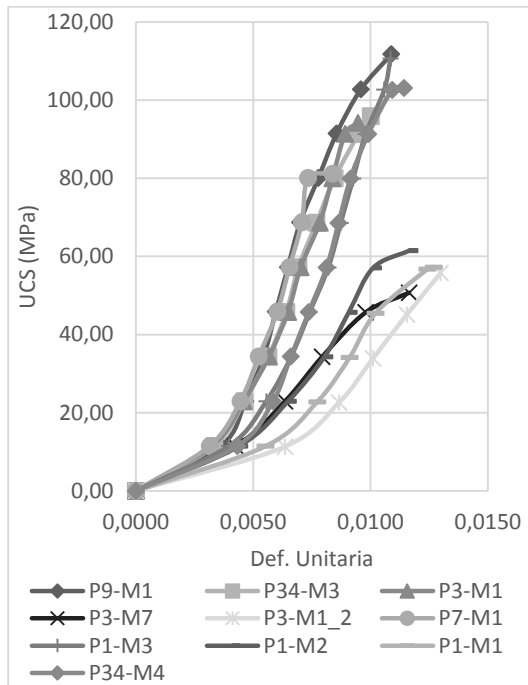


Figura 7 – Tendencias grupo 1

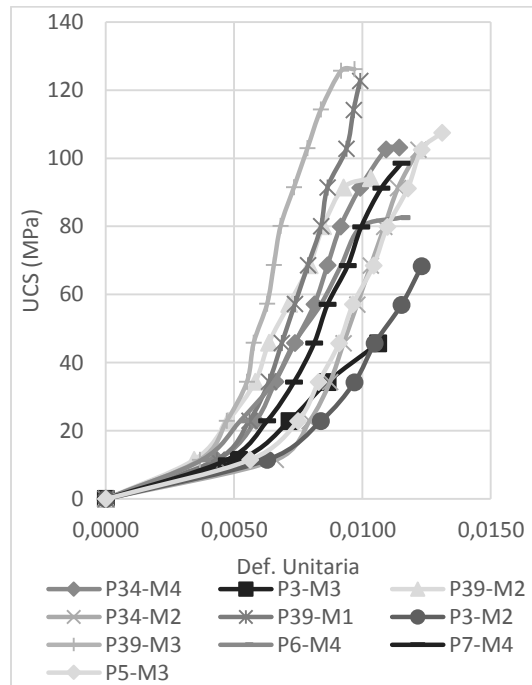
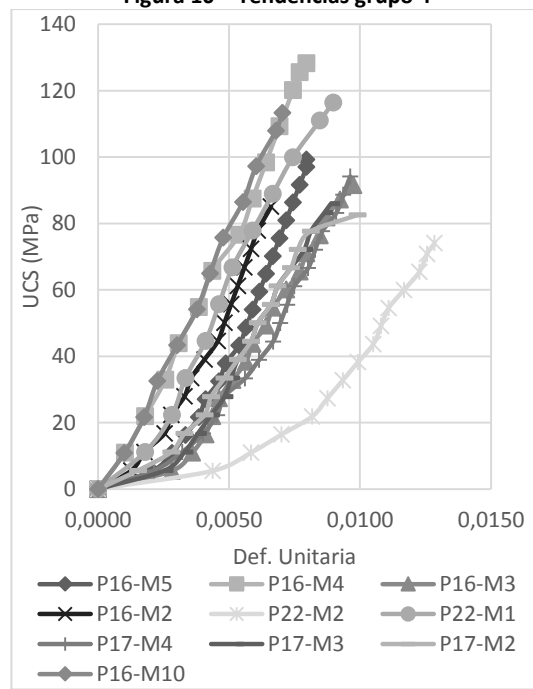
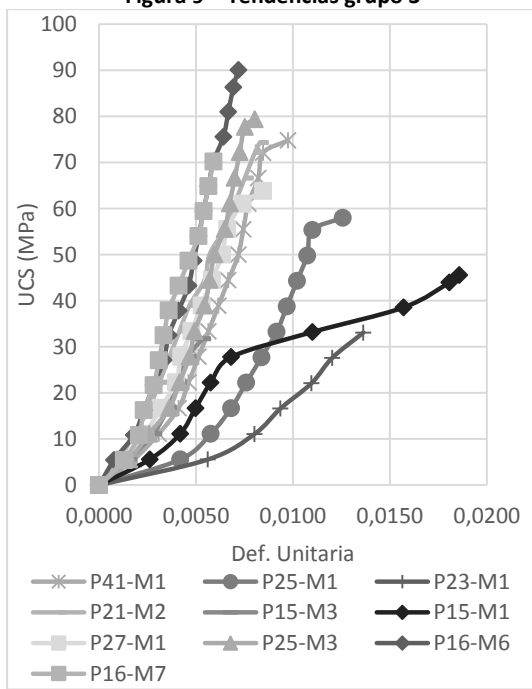
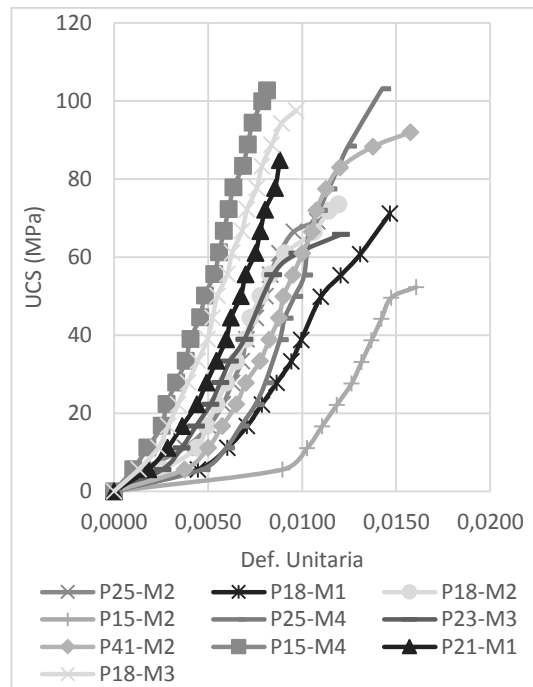
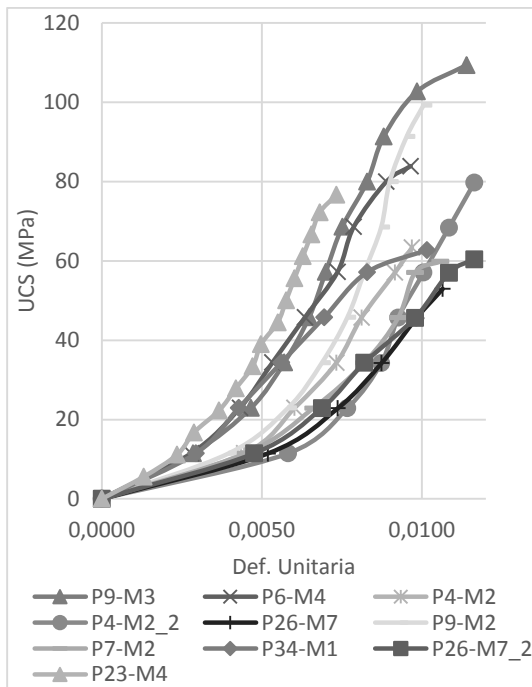


Figura 8 – Tendencias grupo 2



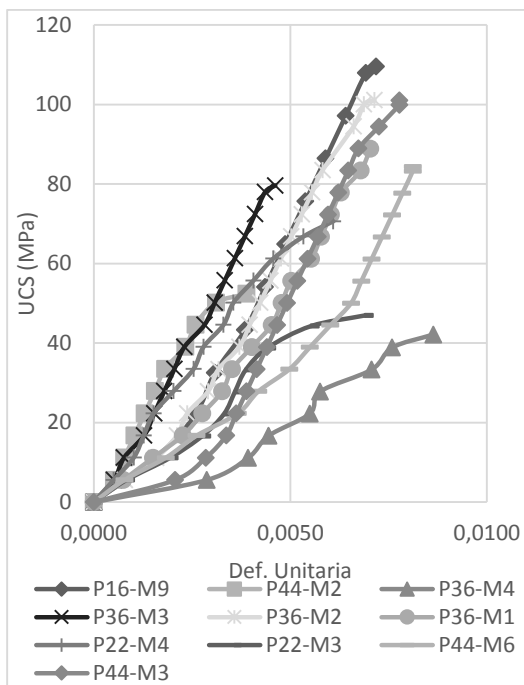


Figura 13 – Tendencias grupo 7

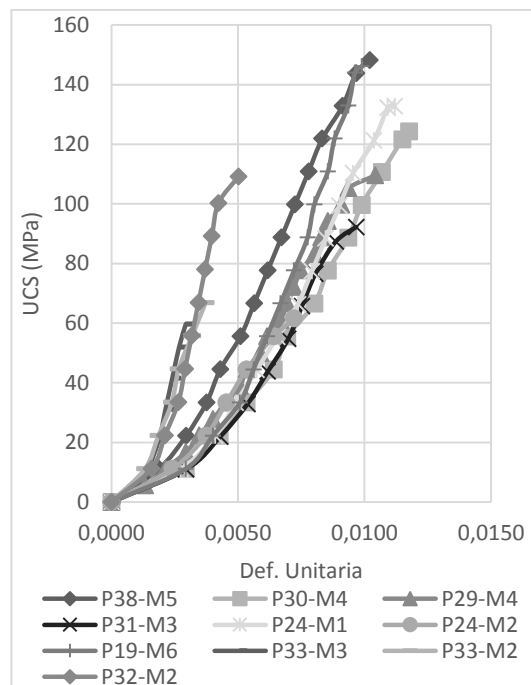


Figura 14 – Tendencias grupo 8

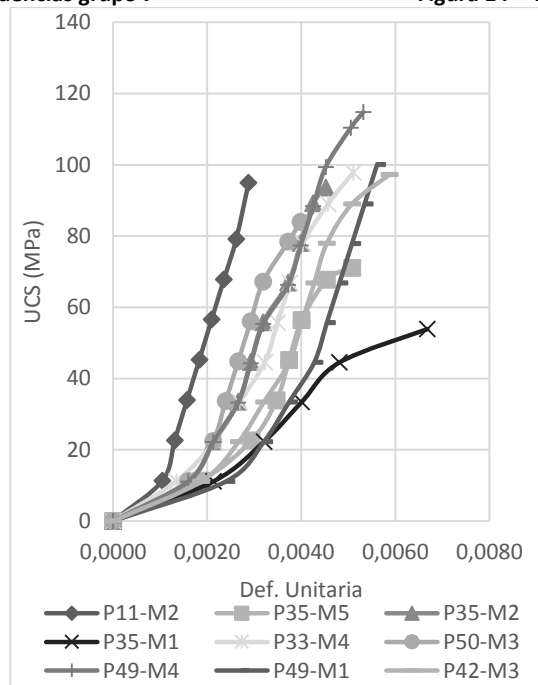


Figura 15 – Tendencias grupo 9

Las anteriores gráficas, además de permitir una primera categorización de las muestras con el fin de determinar tendencias asociadas a su comportamiento mecánico, las cuales presentan variaciones en la rigidez de la rocas ensayadas, también permitieron identificar otras muestras que presentaron problemas durante la ejecución del ensayo de compresión inconfiada, similares a las particularidades mencionadas anteriormente y con otros casos como el fallo de

muestras donde se despicó el núcleo al momento de falla, sugiriendo deficiencias en el proceso de preparación de las mismas. El comportamiento que permitió filtrar estas muestras se identificó en función de los largos tramos de alta deformación sin tomar carga al comienzo del ensayo o resultados de resistencia pico demasiado bajos de acuerdo al tipo de muestra y sus características físicas. En total, se eliminaron 12 muestras de la información preliminar.

A partir de este análisis se identificaron de manera preliminar los rangos de compresión inconfiada del muestreo. Estos fueron: $UCS < 60$ MPa, $60 \text{ MPa} < UCS < 80$ MPa, $80 \text{ MPa} < UCS < 100$ MPa, $UCS > 100$ MPa.

Es importante considerar que teniendo claro el objetivo de esta investigación, el análisis de los resultados se enfocó en la caracterización del comportamiento de los valores de la compresión inconfiada, mas no en las características deformacionales de la masa de roca (rigidez y módulo de elasticidad). Esta última condición podría ser objeto de un análisis similar al presentado en esta investigación.

Adicionalmente, es importante aclarar que esta primera aproximación a los rangos de salida del modelo, corresponde a una definición de valores típicos, con intervalos de igual amplitud, en los cuales pueden ubicarse los diferentes datos de resistencia a la compresión inconfiada utilizados para la elaboración del modelo.

- A partir de las características del comportamiento mecánico de las muestras, inferidas con base en los análisis presentados en el capítulo 3.3, se procedió a enfocar la información obtenida en este primer análisis a partir de las curvas esfuerzo – deformación de las muestras, buscando satisfacer la necesidad de establecer las variables para las funciones de pertenencia del modelo de lógica difusa. Con base en las descripciones geológicas y las fotografías de las muestras se procedió a identificar las cualidades y/o elementos macroscópicos que pudieran ser utilizados para la estructuración de dicho modelo. Así, partiendo de la característica propia de la lógica difusa, de elaborar relaciones a partir de descripciones cualitativas de un elemento, se establecieron tres (3) variables, con sus respectivas sub-divisiones, asociadas a la descripción visual macroscópica de la muestra y fácilmente identificadas en campo. En la Tabla 7 se puede observar la clasificación y descripción de cada una de las variables.

Tabla 7 – Subdivisión de las variables del modelo.

Grado de Meteorización	
Clasificación	Descripción
<i>Fresco</i>	Núcleo de roca sin afectaciones importantes por meteorización, oxidación leve en discontinuidades y manchas esporádicas en la muestra
<i>Medio</i>	Oxidación leve de los minerales, discontinuidades próximas con desarrollo de pátina
<i>Alto</i>	Afectación química de los minerales que componen la muestra, oxidación avanzada de la roca, rellenos arcillosos en las discontinuidades próximas
Grado de Foliación	
Clasificación	Descripción
<i>Masivo</i>	Los cristales visibles en la muestra no presentan una disposición direccionada. Textura homogénea
<i>Bajo</i>	Direccionamiento de los cristales más no se observa una secuencia de bandas en la muestra
<i>Media</i>	Bandeamiento claro en la muestra de roca, se identifican las capas de minerales. No se presenta un plano de falla físico
<i>Alta</i>	Bandeamiento fuerte, caracterizado por discontinuidades (superficies de debilidad) identificables entre las bandas
Tamaño de Grano	
Clasificación	Descripción
<i>Fino</i>	textura masiva de la muestra, no es fácil identificar los granos a simple vista
<i>Medio</i>	granos de tamaño milimétrico, se pueden observar a simple vista
<i>Grueso</i>	granos de tamaño centimétrico

Esta descripción se realizó de acuerdo a las necesidades del proyecto, al proceso sistemático implementado para la descripción de frentes de excavación y las características de la roca identificables a simple vista. De esta manera se establecieron parámetros claros que permitieran definir el grado de pertenencia de una muestra dentro de cada uno de los grupos.

En este punto se debe aclarar que la descripción de cada una de las variables se realizó de manera cualitativa, teniendo en cuenta el procedimiento que normalmente desarrolla el personal de campo para la caracterización y levantamiento de macizos rocosos, teniendo siempre presente que sea fácilmente apreciable dentro del tipo de roca para el cual se ha elaborado. En caso de extrapolar la estructura del modelo a otro tipo de formación, todas estas descripciones deberán ser ajustadas a las condiciones particulares que deseen ser analizadas.

Las características típicas de las diferentes categorías se muestran de la Foto 3 a la Foto 9.



Foto 3 – Núcleo de roca de la categoría Meteorización Baja.



Foto 4 – Núcleo de roca de la categoría Meteorización Media.



Foto 5 – Núcleo de roca de la categoría Foliación Baja.



Foto 6 – Núcleo de roca de la categoría Foliación Media.



Foto 7 – Núcleo de roca de la categoría Tamaño de Grano Fino.

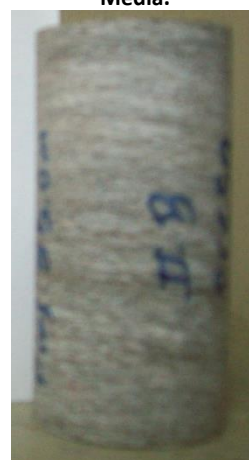


Foto 8 – Núcleo de roca de la categoría Tamaño de Grano Medio.



Foto 9 – Núcleo de roca de la categoría Tamaño de Grano Grueso.

- Con el fin de analizar la distribución de los datos de compresión simple respecto a las variables definidas, se grafica de acuerdo a los rangos definidos para cada una de estas y poder establecer los rangos de resistencia inconfiada asociados a cada una de las variables. Dicha distribución se puede apreciar en las Figuras 16, 17 y 18.

El peso o nivel de pertenencia dado a cada una de las divisiones de las variables seleccionadas para la estimación de la resistencia a la compresión inconfiada, se asignó de forma intuitiva, y obedeció a la variación física de cada una de estas para finalmente seleccionar las condiciones presentes en las muestras analizadas para la elaboración del modelo. La definición de cada uno de estos pesos permitió también definir las funciones de membresía y operaciones entre las diferentes variables para así elaborar el árbol de interrelaciones que componen el modelo de lógica difusa.

La distribución de los rangos de compresión inconfiada asociados a las características individuales de cada variable permitió también estructurar las posibles relaciones que finalmente se utilizarían para elaborar el bloque de salida, asociando las funciones de pertenencia para los rangos de salida de la resistencia a la compresión inconfiada.

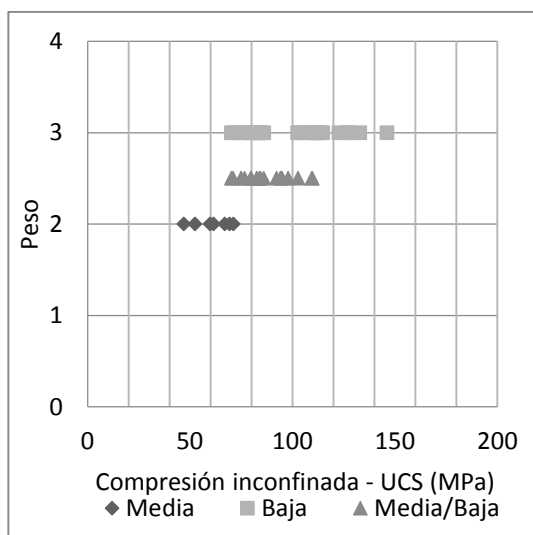


Figura 16 – Distribución UCS vs. Grado de Meteorización.

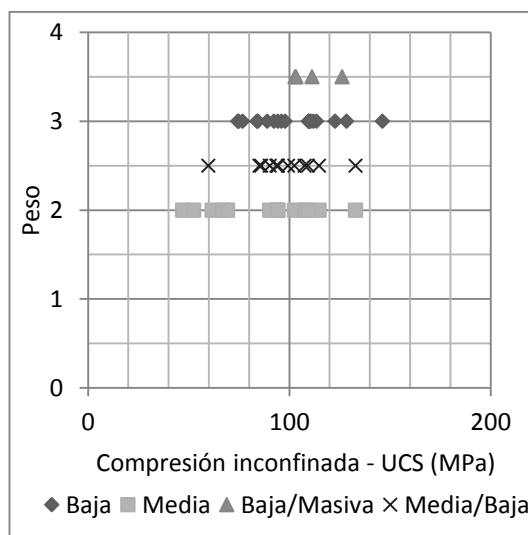


Figura 17 – Distribución UCS vs. Grado de Foliación.

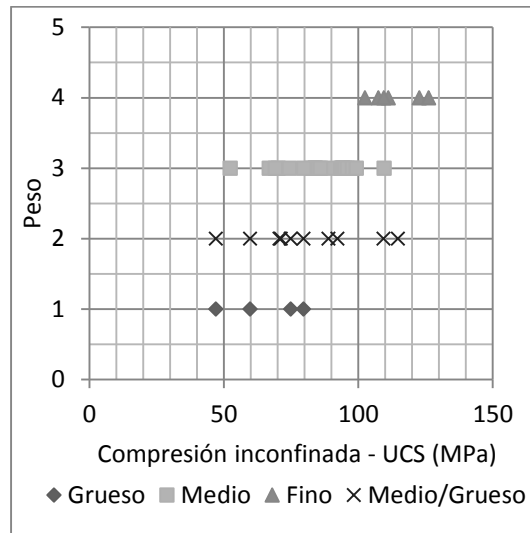


Figura 18 – Distribución UCS vs. Tamaño de grano.

Observando la estructura obtenida a partir de esta distribución, se procedió a elaborar la configuración preliminar del modelo de lógica difusa para la estimación de la resistencia inconfiada del gneis encontrado en el proyecto hidroeléctrico Ituango, como se muestra en la Figura 19, utilizando como herramienta de programación el software Matlab¹⁶, específicamente el módulo “Fuzzy Logic Toolbox”.

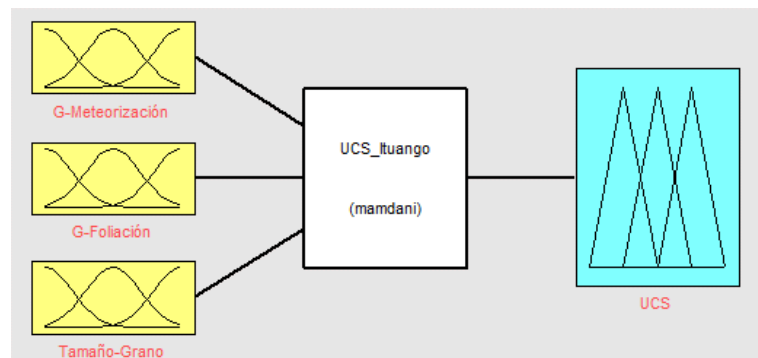


Figura 19 – Estructura general del modelo de lógica difusa para estimar la resistencia a la compresión inconfiada.

- Esta configuración considera el aporte de las tres variables de entrada definidas con el fin de estimar la resistencia de la roca intacta en función de la descripción cualitativa de la misma. A partir de este punto se debió realizar nuevamente una revisión exhaustiva de las muestras disponibles para la elaboración del modelo, buscando realizar la calificación de cada una de estas y así poder definir el tipo de interacción que existe entre cada una de las variables. Durante este proceso, se encontraron algunas muestras adicionales que no cumplían con las características necesarias para la elaboración del modelo (defectos previos a la ejecución del ensayo que podrían afectar el valor de resistencia obtenido), por lo que finalmente, el grupo de muestra

utilizado se redujo a 50 para el análisis y elaboración del modelo y 10 para verificación de los resultados obtenidos.

Así, el modelo de lógica difusa consideró el aporte de cada una de las variables teniendo en cuenta la distribución de los resultados de compresión inconfiada para cada una de las combinaciones posibles. En la Tabla 8 se presenta el peso asignado a cada uno de las variables; en la Tabla 9 se muestran las relaciones establecidas entre las funciones de pertenencia del modelo, así como el grupo de valor de compresión inconfiada relacionado a cada una. Esta asignación se realizó a partir del análisis de los valores de compresión inconfiada correspondientes a cada relación, definiendo el rango de salida adecuado para cada una de estas.

Tabla 8 – Definición de valores para cada una de las variables del modelo.

Grado de Meteorización		
Descripción	Peso	Peso normalizado
Intacto	4	1,00
Bajo	3	0,75
Medio	2	0,5
Alto	1	0,25
Grado de Foliación		
Descripción	Peso	Peso normalizado
Masivo	4	1,00
Bajo	3	0,75
Medio	2	0,5
Alto	1	0,25
Tamaño de Grano		
Descripción	Peso	Peso normalizado
Fino	4	1,00
Medio	3	0,75
Grueso	1	0,25

Tabla 9 – Posibles combinaciones para las funciones de pertenencia.

Combinación	Grado de Meteorización	Grado de Foliación	Tamaño de Grano	Grupo UCS	UCS _{promedio} del Grupo (MPa)
1	Bajo	Bajo	Fino	1	114
2	Bajo	Bajo	Medio	2	111
3	Bajo	Bajo	Grueso	3	104
4	Bajo	Medio	Fino	3	104
5	Bajo	Medio	Medio	4	92
6	Bajo	Medio	Grueso	5	84
7	Medio	Bajo	Medio	5	84
8	Medio	Bajo	Grueso	6	76
9	Medio	Medio	Medio	7	72
10	Medio	Medio	Grueso	8	65

Las funciones de pertenencia para cada una de las variables se presentan en la Figura 20 para el grado de meteorización, Figura 21 para el grado de foliación y Figura 22 para el tamaño de grano. En el caso del conjunto de salida, en la Figura 23 se muestran las funciones de pertenencia para los diferentes rangos de compresión inconfiada definidos para cada una de las relaciones.

Algunas de las posibles combinaciones no fueron incluidas en el modelo ya que los resultados de la clasificación de las muestras base para la elaboración de este no las representaban. Es posible que de ampliar el universo de muestras disponible para la conformación de las funciones de pertenencia se pueda identificar nuevas combinaciones y establecer el rango de salida para la compresión inconfiada respectiva.

Para la formulación de las diferentes funciones de membresía se tomaron las diferentes opciones disponibles en la herramienta “Fuzzy Logic Toolbox” de tal forma que se lograra ajustar el modelo a la distribución de datos de resistencia a la compresión inconfiada disponible. En la Tabla 10 se presentan las diferentes ecuaciones utilizadas para la elaboración de las funciones de membresía correspondientes a cada una de las variables, teniendo en cuenta que para los rangos extremos se utilizaron funciones sigmoideas y en forma de Z (Z-shaped) y para los rangos intermedios se formularon las funciones de membresía con una combinación de dos funciones simétricas de gauss. El uso de la función en forma de Z se debió a la necesidad de contar con un tipo de formulación inversa a la sigmoidea, que permitiera cubrir el rango de menor grado de pertenencia en el caso de la variable Tamaño de Grano

Para los intervalos de salida de la resistencia a la compresión inconfiada, se utilizaron funciones tipo campana de gauss, las cuales se presentan en la Tabla 11.

Tabla 10 – Formulación para cada una de las funciones de membresía.

Variable	Función de membresía	Tipo	Ecuación	Parámetros
Grado de Meteorización	Bajo	Sigmoidal	$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x+c)}}$	$a = 30$ $c = 0,6$
	Medio	Comb. gaussiana	$f(x; \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}}$	$\sigma_1 = 0,1$ $c_1 = 0,375$ $\sigma_2 = 0,05$ $c_2 = 0,55$
Grado de Foliación	Bajo	Sigmoidal	$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x+c)}}$	$a = 30$ $c = 0,6$
	Medio	Comb. gaussiana	$f(x; \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}}$	$\sigma_1 = 0,1$ $c_1 = 0,375$ $\sigma_2 = 0,1$ $c_2 = 0,55$
Tamaño de Grano	Fino	Sigmoidal	$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x+c)}}$	$a = 30$ $c = 0,8$
	Medio	Comb. gaussiana	$f(x; \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}}$	$\sigma_1 = 0,1$ $c_1 = 0,6$ $\sigma_2 = 0,085$ $c_2 = 0,75$
	Grueso	Z-shaped	$f(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left(\frac{x-b}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases}$	$a = 0,05$ $b = 0,75$

Tabla 11 – Formulación para cada una de las funciones de membresía de los conjuntos de salida.

Grupo UCS	Tipo	Ecuación	Parámetros
1	Campana de Gauss	$f(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left \frac{x-c}{a} \right ^{2b}}$	$a = 0,067$ $b = 3$ $c = 0,76$
2			$a = 0,073$ $b = 3$ $c = 0,74$
3			$a = 0,073$ $b = 3$ $c = 0,69$
4			$a = 0,1$ $b = 3$ $c = 0,61$
5			$a = 0,13$ $b = 3$ $c = 0,56$

Grupo UCS	Tipo	Ecuación	Parámetros
6	Campana de Gauss	$f(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left \frac{x - c}{a} \right ^{2b}}$	$a = 0,087$ $b = 3$ $c = 0,51$
7			$a = 0,093$ $b = 3$ $c = 0,48$
8			$a = 0,073$ $b = 3$ $c = 0,43$

En la Figura 24, Figura 25 y Figura 26 se presentan las superficies de control resultantes a partir de la combinación de las variables de entrada del modelo. De estas se puede observar que el Grado de Meteorización tiene un peso considerable dentro de la resistencia a la compresión confinada de la roca. Así mismo, el Grado de Foliación también muestra una inferencia considerable al momento de estimar la resistencia a la compresión confinada, mientras que el Tamaño de Grano, tiene un peso menor comparado con las otras dos variables.

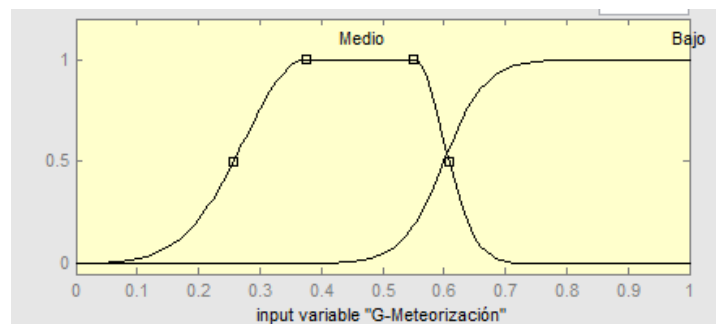


Figura 20 – Funciones de pertenencia para el grado de meteorización.

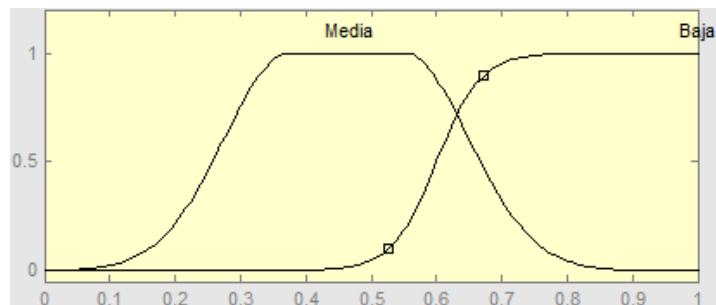


Figura 21 – Funciones de pertenencia para el grado de foliación.

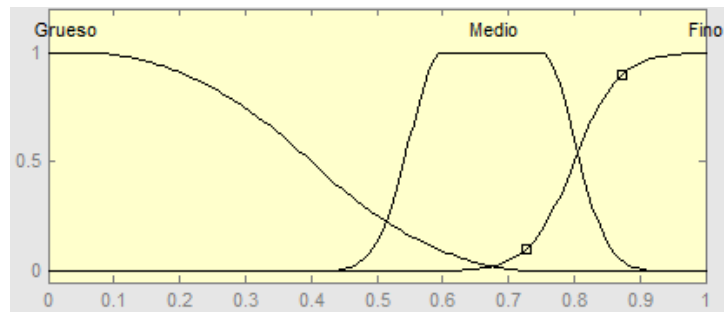


Figura 22 – Funciones de pertenencia para tamaño de grano.

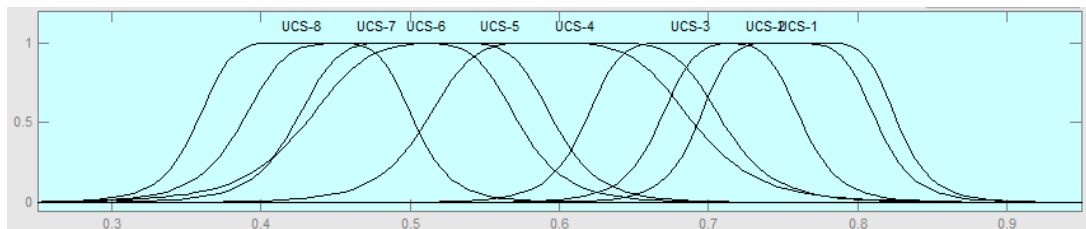


Figura 23 – Funciones de pertenencia para el bloque de salida – Resistencia a la compresión inconfiada (UCS).

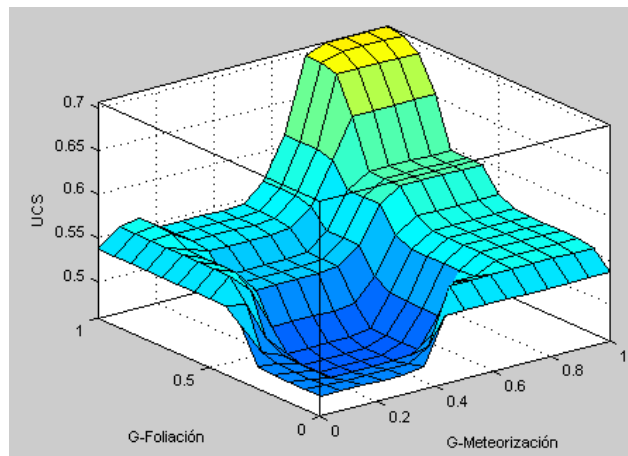


Figura 24 – Superficie de control para la compresión inconfiada en función del grado de foliación y el grado de meteorización.

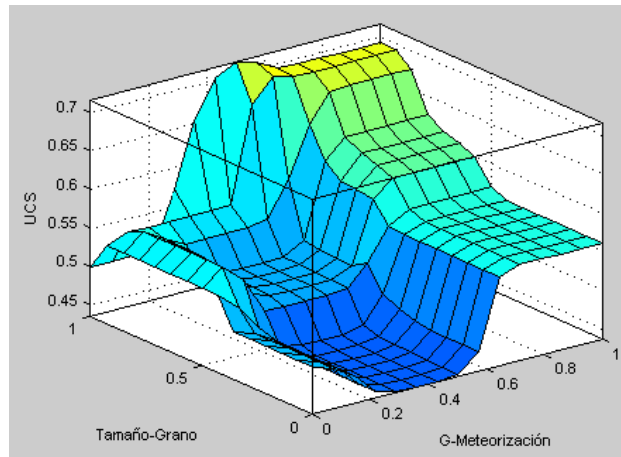


Figura 25 – Superficie de control para la compresión inconfiada en función del tamaño de grano y el grado de meteorización.

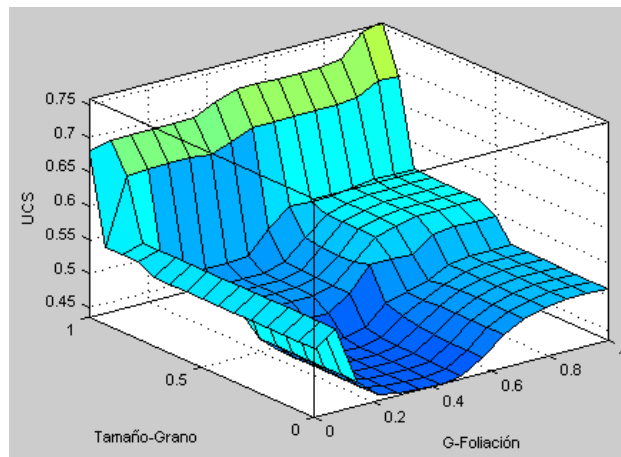


Figura 26 – Superficie de control para la compresión inconfiada en función del grado de foliación y tamaño de grano.

4 VERIFICACIÓN DEL MODELO

El modelo de lógica difusa fue desarrollado para estimar el valor de compresión inconfiada, dentro de un rango de ± 10 MPa, para cada una de las posibles combinaciones de las tres variables establecidas.

Este rango de ± 10 MPa se definió teniendo en cuenta la práctica ingenieril y considerando la desviación propia de la naturaleza del material analizado. Este nivel de precisión es además práctico para incluirlo en la modelación de los diferentes frentes de excavación, donde en lugar de utilizar un valor fijo se define un posible rango para cada una de las variables con el fin de estimar la sensibilidad del modelo a la variación de estas.

De las nueve (9) muestras utilizadas para la verificación del modelo, como se puede observar en la Figura 27, seis (6) de ellas estuvieron dentro del rango de ± 10 MPa, equivalente a un 67 %. Si se amplía el rango a ± 20 MPa, este número aumenta a ocho (8) muestras, equivalente al 89 % de las muestras. Este último rango, aunque se encuentra por fuera del foco definido para el modelo, no es discordante con los resultados obtenidos de la revisión de bases de datos para compresión inconfiada en diferentes tipos de rocas utilizadas para alimentar algunas herramientas de cálculo ampliamente difundidas en el ámbito de la geotecnia. Por ejemplo, en la base de datos disponible en el software Roclab²⁰, para el grupo de rocas en las que se encuentra el gneis se sugiere un rango entre 100 MPa y 250 MPa. En el caso de los esquistos (acorde con la descripción geológica del macizo, la resistencia de la roca de Ituango encajaría entre una combinación de gneis y esquisto), el rango de compresión inconfiada es de 50 MPa a 100 MPa. Estos datos muestran que, para los materiales intervenidos en obras subterráneas y constantemente analizados en la geotecnia, no es adecuado estimar un valor puntual ni intentar establecer un dato exacto a partir de la evaluación de propiedades físicas indirectas, como es el caso de la presente investigación.

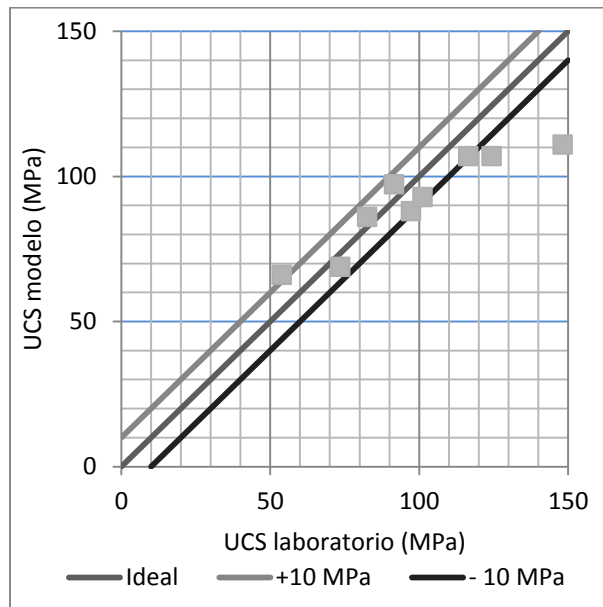


Figura 27 – Resultados de Compresión Inconfiada a partir del modelo de lógica difusa.

Volviendo a los resultados obtenidos con el modelo, se observa que los casos con mayor desviación se encuentran con las muestras por encima de 120 MPa. Esta condición puede estar asociada a la falta de datos que permitieran definir con mayor claridad el tipo de relación existente entre las variables físicas definidas y el valor de compresión inconfiada obtenido en el ensayo de laboratorio. Por otro lado, también es de suma importancia tener en cuenta que estas relaciones se organizaron a partir de un análisis visual de fotografías de los núcleos ensayados, por lo que su precisión está sujeta a la capacidad de observación del individuo y a la calidad de la imagen. Finalmente, al no ser posible realizar un programa de ensayos de laboratorio en el cual se tuviera total control de la muestra y las condiciones propias del ensayo, pueden existir agentes externos que alteran la calidad del resultado y no han sido tenidos en cuenta dentro del presente análisis.

5 CONCLUSIONES

El modelo elaborado a partir de esta investigación muestra la capacidad técnica de la lógica difusa para resolver problemas de caracterización geotécnica, incluyendo variables cuantitativas fácilmente identificables en campo y adaptándose a la variación espacial propia de los macizos rocosos como consecuencia de su génesis e historia geológica.

A partir del análisis de las muestras ensayadas para estimar la resistencia a la compresión inconfiada del macizo rocoso para el gneis de Ituango, fue posible identificar una serie de variables físicas que controlan el comportamiento mecánico de la masa de roca y, a partir de la elaboración del modelo de lógica difusa, fue posible definir un patrón de comportamiento aceptable para la estimación de este parámetro en las diferentes condiciones encontradas dentro de los frentes de trabajo del proyecto.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo evidenciar la influencia del grado de meteorización y foliación dentro de la resistencia a la compresión inconfiada de la roca intacta. El tamaño de grano, aunque con un nivel de participación menor respecto a las otras dos variables, permite ajustar los diferentes rangos de resistencia a la distribución encontrada dentro de los resultados de los ensayos de laboratorio.

Se considera que la precisión de la estimación realizada es adecuada y acorde con las necesidades de un proyecto ingenieril, permitiendo inferir los rangos de resistencia de la roca intacta a partir de la descripción visual de la masa de roca, labor realizada constantemente por el personal de la especialidad vinculado en este tipo de proyectos y que es finalmente registrada en formatos de levantamiento y clasificación de frente de excavación, los cuales podrían complementarse con el resultado de compresión inconfiada obtenido a partir de la utilización de este modelo.

Se debe ser enfático a decir que dichas relaciones solamente son aplicables al marco espacial y entorno geológico en el cual se realizó el análisis de la información disponible, en el caso de otros sitios, demuestra que esta herramienta de lógica difusa permite definir correlaciones útiles entre características cualitativas y parámetros cuantitativos de los materiales; sin embargo, las variables, relaciones y grados de pertenencia, deberán ser elaborados para cada entorno particular, definiendo sus intereses y objetivos propios para el desarrollo del estudio.

Es importante tener en cuenta que la descripción cualitativa de las variables y sus divisiones está enmarcada dentro de las características encontradas en el Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Es por esto que dichas descripciones no pueden ser extrapoladas directamente a otro espacio o entorno geotécnico, ya que la percepción de dichas características en un nuevo entorno debería ser ajustada de acuerdo a la nueva realidad analizada.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarez Grima M. y Babuska R. 1999. Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36. 339 – 349.
2. Alvarez Grima M. 2000. *Neuro-Fuzzy Modeling in Engineering Geology*. A.A. Balkema, Rotterdam, 244pp.
3. Aydin A. 2004. Fuzzy set approaches to classification of rock masses. *Engineering Geology* 74. 227 – 245.
4. Barton N., Lien R. y Lunde J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 6: 4: 189 – 236.
5. Bashari A., Beiki M. y Talebinejad A. 2011. Estimation of deformation modulus of rock masses by using fuzzy clustering-based modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48. 1224 – 1234.
6. Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley. 272pgs.
7. Deere D. y Miller R.D. 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Univ. of Illinois, Tech. Rept. No. AFWL-TR-65-166.
8. Gokceoglu C. 2002. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. *Engineering Geology* 66. 39 – 51.
9. Hoek E. y Brown E.T. 1980. Empirical Strength criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 106, No. GT9, 1013 – 1035.
10. Hoek E., Wood D. y Shah S. 1992. A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses. *Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92*, (ed. J.A. Hudson), 209-214. London, Brit, Geotech. Soc.
11. Hoek E. y Brown E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Abstract*, 34 (8), 1165-1186.
12. Hoek E. y Palmeiri A. 1998. Geotechnical Risks on large Civil Engineering Projects, Keynote address for Theme I – International Association of Engineering Geologists Congress, Vancouver, Canada.
13. Hoek E., Carranza-Torres C. y Corkum B. 2002. Hoek – Brown failure criterion – 2002 edition. *Proc. NARMS-TAC Conference*. Toronto. 267-273.
14. INTEGRAL 2009. *Estudios de Diseño Definitivo Proyecto Hidroeléctrico Ituango*. Empresas Públicas de Medellín.
15. Lin C.T. y Lee G. 1996. *Neural Fuzzy Systems, A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems*. Prentice-Hall.
16. MATLAB, R2011b. The MathWorks, Inc. 1984-2011.
17. Mishra D.A. y Basu A. 2013. Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index test using regression analysis and fuzzy inference system. *Engineering Geology* 160. 54 – 68.
18. Ozturk C.A. y Nasuf E. 2013. Strength classification of rock material based on textural properties. *Tunnelling and Underground Space Technology* 37. 45 – 54.
19. Restrepo J.J. y Toussaint J.F. 1989. Acreciones sucesivas en Colombia: un Nuevo modelo de evolución geológica. *Memorias 5° Congreso Colombiano de Geología*, v.1 fasc., 127 – 146.
20. Roclab V 1.032. Rocscience Inc. Toronto, Ontario, Canada. 2002 – 2011.

21. Romo M.P. y Garcia S.R. 2003. Neurofuzzy Mapping of CPT Values into soil Dynamics Properties. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol 23, Num 6, August, 473 – 482.
22. Sonmez H., Gokceoglu C. y Ulusay R. 2003. An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) system used in rock engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 16, 251-269.
23. Sonmez H. Tuncay E. y Gokceoglu C. 2004. Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara Agglomerate. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41. 717 – 729.
24. Yesiloglu-Gultekin N., Gokceoglu C. y Sezer E.A. 2013. Prediction of uniaxial compressive strength of granitic rocks by various nonlinear tools and comparison of their performances. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 62. 113 – 122.
25. Zadeh L.A. 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control* 8, 338-353.